

第1章 産業ガスと空気分離

「産業ガス」分野は、空気を原料として、これを分離した、酸素、窒素、アルゴンガスを製造・供給する事業から始まる素材産業である。

19世紀末から20世紀初頭にかけて発明された「深冷空気分離法」は、100年以上たった現在でもその基本的な仕組みを変えずに続く技術である。

20世紀後半より、化学産業、半導体産業、パイオ産業など様々な分野と関わるようになり、「ガス屋」の事業も広がってきたが、基本となるガスの科学や空気分離の仕組みは、「知っておきたい」ガス屋の基礎知識である。

1. 産業ガスと空気分離 (industrial gases and air separation)

1. 1 燃料ガスと産業ガス (fuel gases and industrial gases)

1. 1. 1 燃料ガス (fuel gases)

ガスとは、気体を表わす言葉であるが、社会一般で、「ガス (gas)」といえ
ば、「ガソリン (gasoline)」あるいは「燃料ガス (fuel gases)」のことを指す。

ガス欠のガスは「ガソリン」、ガスタンクは「都市ガスのタンク」、ガス抜
きとは、石炭鉱などの「炭層メタン」を抜くことである。いずれも「ガス＝
気体」に由来するが、「可燃性で揮発性の液体」または「可燃性の気体」ある
いは「燃料」である。

「ガス」は、われわれの生活に欠かせないものであり、古くから石炭など
から作られる「合成ガス (syngas)」や「コークス炉ガス (coke oven gas, COG)」
が照明や暖房に用いられてきた。やがて、電力網が発達し、白熱電球や蛍光
灯の普及によってガスが照明に用いられることはなくなったが、燃料用ガス
は非常に広く使用されており、近年は、合成ガスだけでなく、地下資源であ
る「天然ガス (natural gas)」の利用が増えている。日本には、産ガス国から
大量の液化天然ガス (LNG) が輸入されており、国内で LNG を気化、再ガ
ス化された天然ガスが、都市ガス (town gas, city gas) や発電用燃料 (天然
ガス火力発電所あるいは都市ガス火力発電所の燃料ガス) として大量に供
給・消費されている。

また、液体での輸送や保管が比較的容易な「液化石油ガス (liquefied
petroleum gas, 通称 LPG)」も広く利用されている。LPG は流通の過程では液
体であるが、利用時のガス化が容易であり、都市ガスが普及していない地域
などでは非常に重要な燃料ガスとなっている。重要な社会インフラとなっ
ているため、原油ほど大量ではないが、国家事業としての備蓄が行われている。

なお、実際に流通している「LPG」のうち、約半分が油田由来の液化石油
ガス LPG であるが、残り半分は天然ガス田由来の「NGL (natural gas liquid)、
天然ガス液」、いわゆるウェットガスのコンデンセート成分である。したがっ
て、流通している LPG とは LPG と NGL を合わせた総称ということになる。

また、生活に密着した名称である「プロパンガス」と呼ぶ人も多いが、LPG
には、プロパンを主要成分とする製品とブタンを主成分とする製品があるた

め、プロパンという呼び方は正しくない。

一方、内燃機関に使用される石油燃料 (petroleum) のうち、最も普及しているオットー・サイクル用燃料を、英語では「ペトロール (petrol)」、米語では「ガソリン (gasoline)」と呼び、日本語は「揮発油」と呼ぶ。日本では米語の「ガソリン」の名称が普及している。この燃料を用いるオットー・サイクルやバンケル・サイクルなどのレシプロ式の内燃機関を「ガソリン・エンジン」と呼ぶ。

ガソリンは、標準沸点が 30~220°Cの成分を含む混合液体であるが、そもそも揮発性が高いという意味から、「ガス」に由来して作られた言葉である。そのため、通常のガソリンは液体であるにも関わらず、単に「ガス」とも呼ばれるため、少々ややこしい。

米語では、自動車用燃料の給油所はガス・ステーション (GS) である。日本では、LPG (液化石油ガス) 自動車用の補給所 (オート・ガス供給所) を、ガス・スタンドと呼び、GS をガス・ステーションではなくガソリン・スタンドと呼ぶが、これは和製英語である。また、ガス・ステーション (GS) やガソリン・スタンドでは、ガソリンだけでなく、軽油、灯油などのガソリン以外の液体燃料も取り扱っている。

燃料タンクが空になってエンジンが動かなくなることを日本語では「ガス欠 (out of gas)」というが、ガソリンだけでなく、軽油や重油など他の燃料がなくなる場合もガス欠である。

エンジンに燃料ガスを供給して燃焼エネルギーから動力を取り出す機関を「ガス・エンジン」と呼ぶ。これは、ガソリン・エンジンの短縮形ではなく、CNG や LPG や水素などを燃料とするガス燃料エンジンである。

水素ガスを燃焼ではなく、化学反応の燃料として利用して、電力を取り出す場合は、ガス・エンジンではなく水素燃料電池と呼ぶ。宇宙船で使用され、現在は、船舶や自動車などの動力としての実用化開発が進められている。

燃料電池自動車 (FCV) 用の水素ガスの補給インフラは、ガス・ステーション (ガソリンスタンド) やオートガススタンドに比べると、ほとんど整備されておらず、こらからの課題である。

水素ガスの補給所は、経済産業省が制定する技術基準では「圧縮水素スタンド」とされている。「水素ガス」ではなく単に水素という言葉が使われており、CNG や LPG のような「ガス」の文言はない。自動車用燃料補給設備に関する公式の用語は、「圧縮水素スタンド」の他に、「ガソリン・スタンド」、「ガス・スタンド」、「充電スタンド」などとなっており、補給所を意味する

日本語は「スタンド」に統一されている。しかし、水素の場合は、英語の名称"hydrogen filling station"から「水素ステーション」という名称が広く使われている。

ガス管、ガスタンク、ガスメータ、ガスライター、ガスを引く、ガス欠、など日常会話で「ガス」と呼ばれているものの多くは、基本的には、「燃料ガス」あるいは「液体燃料」のことを指している。燃料以外で、日常会話に現われる「ガス」は、何となく「ガス状」のものであり、山にかかる霧や霞（「ガスがかかる」）、炭酸ガス飲料（入っていない飲料をノンガス飲料）、（排気）ガス、などがあり、いずれも何となく見えそうなもの（霞や泡や煙など）がガスと呼ばれている。風や空気をガスと呼ぶことはほとんどない。

ガスの本来の意味は、「気体」そのものであり、燃料ガスはその一部であることは、多くの人知っている。しかし、「燃料ガス＝ガス」という関係が、社会に深く根付いており、本来の「気体」の方がマイナーな使われ方をしている。

燃料ガスの「ガス事業」が始まったのは、19世紀初頭（英国）、日本に伝わったのが19世紀後半（1872年）であり、欧州で「酸素会社」、「工業ガス」の事業が始まったのは、19世紀末から20世紀初頭にかけてである。先に燃料ガスを利用するビジネスや社会インフラがあり、その後、それ以外のガスの利用が始まったため、燃料以外の目的で使用される「その他のガス」を「工業ガス」「産業ガス」と呼ぶようになった。

ガスビジネスの領域としては、燃料ガス（都市ガス、タウンガス、LPG）とその他のガス（産業ガス）とに区分されることになるが、その境界には少しあいまいなところがある。燃えるガス全てが燃料ガスというのではなく、主に燃料としては使用されない燃えるガスの場合は、「可燃性ガス」と呼ばれ、主に産業ガス会社の取り扱い商材となる。たとえば、可燃性ガスであるアセチレンガスは、ガス会社や石油会社が取り扱う燃料ガスではなく、産業ガスの会社が取り扱う可燃性ガスである。溶接・溶断用に用いる酸素ガスとアセチレンガスは、ガス会社ではなく、産業ガス会社から供給される。LPGは、流通がシリンダービジネスであるということもあって、燃料ガス会社と産業ガス会社の両方が取り扱っている。

半導体材料ガスの多くが、可燃性ガスであるが、これも産業ガスの商材となっている。業界内部では、特殊ガス（特ガス）、半材ガスなどという呼び名もあり、可燃性ガス、毒性ガスなどが含まれ、取り扱いに特殊な技術や設備

を必要とするこのようなガスを安全に利用するためのノウハウが産業ガスの会社にある。

水素ガスの場合は、石油や石炭が原料であるため、大量に製造・自家消費する鉄鋼業や石油化学系の会社を取り扱うことが多いが、シリンダーを用いた供給や超高純度の水素ガスは産業ガスの会社を取り扱っている。

可燃性ガスと燃料ガスの境界にあいまいな部分はあるが、基本的には、燃料ガスを除くその他のガス全てが、産業ガスである。

補足 1-1：照明利用から始まった燃料ガスと酸素ガス

都市ガス・燃料ガスの簡単な歴史

1812年：ロンドンでガス灯への燃料ガス供給が始まる（都市ガスの起源）

1872年：ガス灯の照明用にガス製造所が作られた（横浜）。

1874年：神戸瓦斯がガス事業を開始

1876年：東京府瓦斯局が設立

1884年：プリン兄弟が最初の酸素会社を設立（産業ガスの起源）

1897年：大阪瓦斯が設立。

ガスマントル（室内用照明器具）が輸入され、街灯以外の照明に利用
さらにガスの熱を利用した調理用、暖房用、動力用に移行

1907年：酸素の製造装置が輸入され工業ガス事業が始まる（産業ガス）

1929年：霞ヶ浦に寄港した飛行船ツェッペリン伯号へのLPG供給

1938年：自動車用燃料としてLPG使用が認められる。

初期の都市ガスは、街灯などの照明用（燃料）に用いられたが、最初の工業用酸素の主な用途も照明用であった。プリン兄弟が「プリン酸素会社BOC」という世界初の産業ガス会社を設立しプリン・プロセスを用いて空気を原料にして酸素の製造を始めた時、酸素ガスの主な用途はライムライトと呼ばれる照明器具用ガスであった。

ライムライト（limelight）のライムは石灰であり、これを利用した照明器具が19世紀中頃に発明され、電灯が普及するまでの間、用いられた。水素と酸素をバーナーで燃焼させ、そこでできた高温の酸水素炎を石灰に吹き付け、白熱した石灰からの光をレンズで集光するというのがライムライトの仕組みである。ライムライトの明るい光は、軍用の投光器や劇場用の照明などに用いられ、舞台上脚光を浴びるということから、ライムライトという言葉は、「名声」を意味するようになった。

1. 1. 2 工業ガスと産業ガス (industrial gases/ industrial gases and medical gases)

日本では、燃料以外の産業用のガスを、昔は「工業ガス」と呼び、現在は、「産業ガス」と呼んでいる。英語では、工業ガスも産業ガスも industrial gases であり、違いはない。

日本語の「工業」は「製造業 (manufacturing industry)」を意味しており、最初の主なガスの供給先が製造業であったため、industrial gases を工業ガスと訳するのが適当であった。しかし現在、われわれがガスの供給先としている産業分野は、第一次産業（農林水産）から第二次産業（製造、建設、電気・ガス・水道）、第三次産業（情報通信、金融、運輸、小売、サービス）まで「産業 (industry)」全体である。同じ industrial gases であるが、工業（製造業用の）ガスというよりも、産業全般のガス「産業ガス」の方がよさそうである。

一方、ガスは古くから「医療ガス medical gases」としても用いられてきた。酸素を発見したプリーストリーは麻酔ガスの合成でも知られており、ガスには何か医療効果があると考えられ研究されてきた。18世紀は、まだ気体という概念は空気だけであり、異なる種類の空気が生物や人体与える影響が調べられており、麻酔ガスもそのような空気のひとつと考えられていた。

現在も呼吸用ガスや麻酔ガスのような医療用ガスが利用されている。医療用ガスは、燃料ガス業界ではなく産業ガス業界が取り扱う商材である。

医療も産業の中に含まれているので医療用ガスも含めて産業ガスと呼んでもよいと思われるが、歴史的経緯もあって、現在の国内の産業ガス業界を代表する団体の名称は、「日本産業ガス・医療ガス協会」(英語名は JIMGA、Japan Industrial Gases and Medical Gases Association、「ジムガ」となっている。この名称からは、「産業ガス」の中に「医療ガス」が含まれるのではなく「産業ガス」と「医療ガス」は並列である。

医療ガスの商材には、MRI 装置に用いる液体ヘリウムや PET 診断用の薬剤の原料である酸素 18 安定同位体 (H_2^{18}O) のような医療用途や研究用途の産業ガスと、人体に直接使用する医療用ガス（麻酔用笑気ガス、人工空気、呼吸用酸素など）がある。一般の産業ガスの製造・供給は、高圧ガス保安法の規制を受けるが、医療用ガスの場合は、さらに、薬事法の規制を受けることになる（医薬品ガスと局方外医薬品ガス）。

なお、産業ガスの業界は、「鉄鋼業」や「自動車産業」のように呼ぶと、産

業ガス業、産業ガス産業となり、日本語として分かりにくいので、ここでは、「産業ガス業界」あるいは単に「産業ガス」と呼ぶこととし、産業ガスには医療ガスも含まれることにする。「産ガス」と縮めることもあるが、天然ガスの生産国や輸出国を意味する「産ガス国」の産ガスと紛らわしいため、ここでは縮めないことにする。

1. 1. 3 ガス屋の名称

ガスは、英語の「gas」やドイツ語の「Gas」がそのまま日本語になっている。スペイン語 gas、フランス語 gaz など、ほとんどの言語でほぼ同じ言葉が使われている。中国語では、日本語の字体とは異なるが「気体」を用いるので、「気体公司」や「気体容器」「医療気体」などの言葉がみられる。日本語でもガスを「気体」と書くことができ、ガスと気体の両方の言葉が様々なところで用いられている。特にルールがある訳ではなさそうであるが、業界としては「産業気体」ではなく、「産業ガス」と呼び、企業名には「気体」を使わずに「ガス」または「瓦斯（がす）」を使うことが多い。

企業や団体名に、日本語の気体ではなく外国語のガスを用いるということが一般的になっているということは、ガスが既に外国語ではなく日本語になってしまったと考えることができ、ガス屋は、いわゆるカタカナの会社ではない。なお漢字の「瓦斯」は当て字であるが、正式な社名（商号）にこの文字を使用し、通称名としてカタカナの「ガス」を併用する会社も多い。

ガスは、通常は不可算名詞であるが、種類を表わす場合は、可算名詞になるので、Industrial Gases and Medical Gases のように複数形として用いられる（「ガシズ gases」）。

前述のように、ガスは一般的には、燃料ガスであるため、企業や団体の名前が「〇〇ガス」「〇〇瓦斯」となっていれば、多くが、都市ガス供給会社・公社やLPG供給会社である。都市ガスであれば、大手が、東京ガス、東邦ガス、大阪ガス、西部ガス（さいぶがす）の4社あり、全国には、約230のガス事業者（一般企業および公営企業）がある。いずれも特に「燃料ガス」という名称は使っておらず、単に「ガス」と呼ぶ。

一方、産業ガスの会社の場合、現在は多様な商材を取り扱っているが、起業時には、空気を原料とした酸素ガスあるいは窒素ガスの製造・販売を主業務とした会社が多いため、社名には「酸素」や「空気（エア-）」の文字が多い。世界初の産業ガスの会社は、プリン兄弟が興した英国のBOC社（プリ

ン酸素、Brin's Oxygen)である。BOC 社はその後、イニシャルは BOC のまま、British Oxygen (英国酸素)となった。企業名に「酸素」という元素名を用いるのは、現在では珍しいが、昔は多くあった。日本でも古くからある産業ガスの会社には、帝国酸素、日本酸素など、社名に元素名「酸素」が使われていた。

米国には、APCI 社 (Air Product & Chemicals、エアプロダクツ社)、Prax Air (プラクスエア社)があり、こちらは「空気」を社名に使っている。社名に「酸素」の文字がある場合は、ほぼ産業ガスの事業会社が思い浮かぶが、「空気」の場合は簡単ではない。多くの航空会社が社名に Air を用いており、空圧機器 (圧縮空気を用いる産業用機械)を取り扱う会社も多いため、社名に「空気」があるだけでは業種が判読が難しい。そこで、企業名に空気を使う産業ガスの会社の場合は、liquid、gas、cryo-、chemical、液化、などの産業ガスを連想させる言葉と組み合わせることが多い。

たとえば、Air France (エール・フランス)はフランスの航空会社であるが、Air Liquide (エア・リキード)はフランスの産業ガス会社である。空気の air は、英語でもフランス語でも綴りが同じ、液体は、英語の liquid とフランス語の liquide がよく似ているので、フランス語を知らなくても英語の連想から「液体空気」という言葉が会社名になっていることが分かる。液体空気の意味が分かれば、航空会社や空圧機器の会社ではなく、産業ガスの会社であることが分かる。なお、エア・リキード社は、かつては、フランス語表記、L'Air liquide が使われ、日本でも、レールリキッド社と呼ばれていたが、現在は、英語読みが普及しており、エア・リキード社と呼ばれる。世界の産業ガス企業の中では、フランスのエア・リキード社のグループとドイツのリンデ社のグループの2つの規模が大きい。それぞれ、クロードとリンデという空気分離装置を発明した科学者が創業したものである。前者は「液体空気」を社名に、後者は創業者の名前を社名にしている。日本や米国にある産業ガスの企業各社の成り立ちは、このフランスとドイツの2社が現地法人として設立したものの、あるいは、地域資本が、その技術や事業手法を導入して作ったものである。

1. 1. 4 産業ガスとセパレートガス

産業ガスの主要な製品は、空気を分離することによって製造される酸素、窒素、アルゴンである。これらのガスを、業界では「エアセパレートガス」あるいは「セパレートガス」と呼び、産業ガスビジネスの基本は、セパレートガスを製造し、これらのガスを圧縮して配管や容器で顧客に供給することである。

「セパレートガス」の事業は、石炭などから作られる「合成ガス」や地下資源として採取される「天然ガス」ほど広くは知られていないが、欧州で発明され、すぐに米国と日本に伝わった100年以上の歴史を持つ産業である。

製造業というと、機械を組み立てたり、化成品を合成したり、様々な材料を加工することを思い浮かべる人もいるが、分離（セパレーション）も非常に重要な製造業である。鉄鉱石（酸化鉄）を還元して鉄を分離したり、ボーキサイトからアルミニウムを分離したり、海水中から塩を取り出したり、空気から酸素を分離したりするのも重要な製造業である。ものづくりの中には、このように分解や分離してより純粋な物質を作り出すという産業が不可欠であり、様々な加工や合成を行う産業に対して素材を供給する役割が大きい。空気を分離してセパレートガスを作ることを「酸素の製造」「窒素の製造」などと言う。

産業ガスの会社には、セパレートガス事業以外の事業として、複数のガスを混合・調整して溶接シールドガスや合成空気として利用する「混合ガス」の製造があり、ガスを液化あるいは液化ガスを再ガス化させて供給する「高圧ガスの製造・供給」がある。混合ガスの製造も高圧ガスのハンドリングも基本の技術は、セパレートガスの製造から派生したものである。

さらにガスを利用する技術そのものも商材であり、たとえば、溶接・溶断技術、燃焼技術、半導体の製造装置、低温ガスを利用した凍結・貯蔵装置・技術などを提供している。このようなガス利用技術やガス周辺機器を「ガス・アプリケーション」と呼んでいる。通称は、ガス・アプリではなく「ガス・アップ」という。ガス・アップは、ガスの市場を拡大するための、ガスの利用技術（ツール）でもある。

1. 1. 5 産業ガスと高圧ガス

産業ガスは、圧縮された高圧ガスとして、貯蔵、輸送、販売されるため、規制する法律は「高圧ガス保安法」とその関連規則である。

産業ガスを高圧ガス、産業ガスの事業会社を高圧ガスメーカー、高圧ガス販売者と呼ぶこともあり、産業ガス業界は、高圧ガス業界と呼ぶこともできる。

高圧ガス保安法は、高圧ガスによる災害を防止するための法令であって、「高圧ガスによる災害を防止するため、高圧ガスの製造、貯蔵、販売、移動その他取扱及び消費並びに容器の製造並びに取扱等、広範囲に規制」する。

以前は、高圧ガス取締法と呼ばれていたが、取締法と言うと社会に対して何か危険なものを一律に取り締まるための法令を連想するが、1997年に、高圧ガスを安全に取り扱うための法令として改題・改正されている。産業関連の法令としては、電気用品取締法や高圧ガス取締法などが、近年になって保安法と名前を変えているが、毒物及び劇物取締法や農薬取締法、肥料取締法などは現在もそのままの名称である。法に基づいて設置される独立した第三者民間機関として「高圧ガス保安協会、The High Pressure Gas Safety Institute of Japan、通称 KHK」がある。

1. 2 産業ガスと純ガス

1. 2. 1 純ガス

石油や天然ガス、それから製造される化成品は、混合物である。

純粋なガソリンや純粋な重油、軽油という物質はなく、いずれも多くの物質が混じった混合物であり、成分が調整・ブレンドされた製品である。

石油精製で採取される「液化石油ガス、LPG」は、様々な炭化水素が混じった混合液体である。工業用のものは、主成分がブタン（+ブチレン）、家庭用のものは主成分がプロパン（+プロピレン）である。世界的にみると、LPGとして流通している液化ガスのうち半分は石油随伴ガスであるが、残り半分は、天然ガス随伴液体であるため、液化石油ガスという呼び方は厳密には正しくない。

石油精製の低沸成分を回収して液化したものが LPG、天然ガスの高沸成分をコンデンセートとして回収したものが NGL であり、LPG と NGL を合わせたものが、一般に LPG と呼ばれている。家庭用のものは、プロパンの濃度が高いため、俗称として「プロパンガス」と呼ばれることもあるが、当然のことながら純粋のプロパンガスが供給されているのではなく、プロパンが含まれる混合ガスのことを指している。

天然ガス (natural gas) は、地下資源として産出する燃料ガスの総称である。種類が多く、産地によって組成が様々である。基本的には、「メタンを主成分とする多成分の混合ガス (燃料ガス)」を天然ガスと呼んでいる。天然のものなので、組成や物性がばらばらなのは仕方なく、その成因は未だに分かっていない。国や団体によっては天然ガスを「化石燃料」と断定して取り扱うところもあるが、石油と天然ガスはその起源をめぐる学説が確立しておらず、特に非常に種類の多い天然ガスの起源・成因の解明は容易ではない。生物由来を示すバイオマーカーのある天然ガスとそうでないもの、ウラン由来のヘリウムを多く含む天然ガスとそうでないもの、かつて大量に大気中に放出され地上の生命を大量絶滅に追い込んだとされる地殻中のメタンハイドレートなど、地下や海底にある天然ガスは謎だらけである。

日本に輸入される天然ガスは、産ガス国 (天然ガス産出国) で輸送用に精製・液化された液化天然ガス (LNG, liquefied natural gas) である。主成分はメタンであり、液化工程の妨げになる不純物が予め除去、精製され、液化される時には、NGL が分離・回収されている。しかし、それでも LNG は、純

粋なメタンではない。エタンなどを含む混合液体である。ガソリン、軽油、LPGのような石油製品だけでなく、天然ガスも含め工業用の液体・気体原料・製品のほとんどは純物質ではなく混合物である。

さらに、その他の工業製品、金属、化成品、あるいは食品や飲料水など、われわれの周囲で流通しているもののほとんどが、混合物や合金である。少量販売される「試薬」を除くと、産業用に流通する製品には、純物質はほとんどない。しかし、産業ガスビジネスが取り扱うガス製品は、基本的に「純ガス」である。純物質に近いものをこれほど大量に製造・販売する業種は非常に珍しい。他の素材産業と産業ガスを比べたときの最も大きな違いである。

現在の産業ガスビジネスでは、純ガス以外にも、混合ガス（溶接・切断ガス、合成空気など）、標準ガス（分析計の校正など）、半導体材料ガス（電子産業向けの電子機材）、医療用ガス（呼吸用酸素、麻酔ガスなど）、安定同位体（天然存在比と異なる組成の同位体、同位体標識化合物）などを取り扱うようになっているが、歴史的には、純ガスが出発点であり、標準ガスや混合ガスも純ガスを混合調整して製造されており基本は純ガスである。また、各種ガスの取り扱い・製造・供給技術、ガスの分析技術、ガスの保安技術なども、基本的には純ガスの製造技術に基づいている。

一般の産業が混合や化合によって商品に付加価値を与えているのに対して、産業ガスの製造は純ガスを基本とするため、類似する技術を用いている場合でも、他の産業とは基本的なところで考え方が大きく異なることが多い。

深冷空気分離装置は、専用の蒸留装置で蒸留分離によって空気を分離するが、これを他の一般的な産業の蒸留装置における蒸留と比較してみる。

石油精製では、常圧蒸留装置（トッパー、topper）を用いて原油を何種類かの製品（留分）に分離して石油化学の原料（中間製品）を生産する。そのため、蒸留塔の製品採取位置（蒸留塔の段）のところで温度管理を行って、取り出す製品の組成や量を制御する。このような蒸留を分別蒸留（分留、topping）と呼ぶこともある。

トッパーの役割は、原油を「沸点の異なる留分」に分離することである。混合物の各成分間に気液平衡関係があるため、各成分を選択的に分離することができる訳ではないが、温度や流量を変えることによって、留分の組成を決めることができ、「分留」という操作が行われる。

分留は、温度によって制御され、沸点の違いによる分離のように思われるが、正しくは、多成分混合物における各成分の「気液平衡」（vapor-liquid

equilibrium、VLE) を利用した蒸留分離であり、蒸留塔の中の混合物の気液平衡関係と運転操作によって製品の組成が決まる。化学工学では気液平衡を用いた分離を蒸留 (distillation) と呼ぶが、産業分野によっては様々な呼び方があり、分留もそのひとつである。

深冷空気分離装置では、混合物である空気を分離するために蒸留分離を利用するが、製品が混合物ではなく純物質であるため、他の産業の蒸留装置とは設計や運転方法が根本的に異なっている。

空気分離では、原料の組成は常に一定 (産地も季節も関係なく一定)、製品は基本的に3種類 (窒素、アルゴン、酸素)、製品は混合物ではなく純ガスであり、蒸留塔の製品採取位置における温度制御を行うこともない。空気を蒸留分離をしているという他の業界の蒸留装置の技術者から、蒸留塔の温度の制御のことを尋ねられることがあるが、深冷空気分離装置の蒸留塔には温度計がない。製品の取り出し位置は決まっており、組成もほぼ純ガスに近く、温度はその場所の圧力に対する平衡温度に間違いのないので、温度を測る必要がない。蒸留塔の温度は制御するパラメータではなく、流量や圧力を制御した「結果の値」である。

石油の場合、原料は輸入原油であり、蒸留塔各部から取り出される様々な製品の量は、在庫量や需要、その他のプロセスとの関係から調整される。原料も製品も常に変化に対応しなければならず、圧力、温度、流量など様々なパラメータがあり、高度な運転テクニックも必要である。空気分離の場合は、原料は空気であり、これはどこでも同じ組成であり、製品の組成も基本的にいつも同じである。酸素と窒素とアルゴンの製品量のバランスだけが調整され、製品は、在庫されることがなくその場で消費される。

深冷空気分離装置で製造されたガスの一部は、液化・貯蔵・輸送され、あるいは、加圧されて高压ガス容器に詰めて輸送される。しかし深冷空気分離装置は、基本的には、原料の調達と製造と製品の消費が同じ場所で行われる地産地消型の装置である。原料、製品の大量在庫とは無縁の産業である。

石油精製の場合、余ったものをそのまま環境中に廃棄することはできないが、空気分離の場合、原料が空気であるため、もし製品量のバランスがとれなければ、一度分離しているのでそのエネルギーがもったいないということを除けば、空気中に放出することも可能である。製品や廃ガスが環境に放出されても空気に戻るだけである。

石油の蒸留と空気の蒸留では、気液平衡を利用した蒸留分離によるという

点は同じであるが、原料が異なること、製品が混合物であるか純物質であるかということ、装置の温度が大きく異なることなど、装置として異なる部分が非常に多い。石油精製の蒸留から空気分離の蒸留を類推すると、かなりの部分が誤解されてしまう。

ここで、「純ガス」といっても 100%の純物質は、あり得ないということに注意が必要である。技術的に 100%が達成できないということもあるが、100%を証明することができないということでもある。

純ガスを取り扱う時に、しばしば「純度」(purity) という用語が用いられる。これは、主要成分の「濃度」(concentration) が、どのくらい高いかということを示す尺度であり、不純物が非常に少ない場合を「高純度」、「純度が高い」といい、不純物が多い場合を「低純度」、製品中の不純物が増えることを「純度が低下した」などという。

純度は、「濃度」や「モル分率」のように定義がはっきりしている用語ではないが、主成分の濃度で表わす方法と、不純物の濃度で表わす方法がある。ガスの「純度」の場合、数字が 100%に近いため、特定の不純物の量 (impurity) を示すことによって純度を表示することが多い。

純ガスには、そこに含まれる不純物の濃度によって、粗ガス、低純(度)ガス、一般ガス、高純(度)ガスなどの種類(グレード)がある。

表 1-2-1 に、代表的な高純度ガスの仕様を示す。

たとえば、高純度アルゴン(大陽日酸(株)カタログの上位グレード G1)では、純度、99.9999%以上、不純物として、酸素 0.1ppm 以下、窒素 0.3ppm 以下・・・などと表示されている。

ガスの純度が比較的低い場合は、主成分の濃度をパーセント表示して、たとえば、99.9%(3N、スリーナイン)などと呼ぶこともある。しかし、ガスが高純度になると主成分は 100%に非常に近いため、これを分析、濃度を測定して直接定量化することはできない。そこで、想定される不純物を高感度に分析し、不純物の合計量を求め、これから純ガスの濃度が推定される。

純ガスの場合、純度が高い、純度が低いというのを決める数字はなく、用途や仕様によって様々である。主成分の濃度で表わすか不純物の量で表わすのか、どちらにするのかという線引きも特に決まっていない。一般的には、工業用の酸素の場合は、パーセント、たとえば 99.7%という表示、窒素の場合には不純物の量が ppm で表示されることが多い。

表 1-2-1 市販の高純度ガスの例
「大陽日酸(株)スペシャルティガス(特殊ガス)」カタログに
掲載の「グレード1(G1)」ガス

濃度	製品	窒素	アルゴン (下段は G3)	酸素	ヘリウム (下段は G2)
	窒素	>99.99995%	<0.3ppm —	<0.2ppm	<0.1ppm <5ppm
	アルゴン		>99.9999% >99.9999%	<0.05ppm	
	酸素	<0.1ppm	<0.1ppm <0.2ppm	>99.99995%	<0.05ppm <1ppm
	ヘリウム				>99.99995% >99.9999%
	一酸化炭素	<0.1ppm	<0.1ppm —	<0.02ppm	<0.02ppm —
	二酸化炭素	<0.1ppm	<0.1ppm <1ppm	<0.02ppm	<0.02ppm <1ppm
	THC*	<0.05ppm	<0.1ppm <1ppm	<0.02ppm	<0.01ppm <1ppm
	水素	—	<0.1ppm <1ppm	—	—
	窒素酸化物	<0.01ppm			
	二酸化硫黄	<0.01ppm			
	水***	<-80℃	<-80℃ <-70℃	<-80℃	<-80℃ <-70℃

※THC(全炭化水素)は、メタンと非メタン炭化水素の合計をメタン換算した
もの(ppmC)。(JIS B 7956)

***水の量は、露点温度(霜点温度)で示す。

分析の対象となる不純物は、原料や製造工程、保管、輸送工程などから混入が想定される物質であるため、それ以外の不純物については、入っていないことは確かめられない。これはガスだけでなく、他の産業の全ての製品についても同じであり、測定対象でない不純物は分からない。

ここで、表中の ppm (parts per million、百万分率) は、パーセント ppc (parts per cent、)と同様、比率を表す無次元の単位で、微量成分の濃度表示に非常によく用いられる。「%」は、パーツ・パー・セントと呼ばれることはめったになく、ほとんどの場合「パーセント」(percent 百分率)と呼ばれるが、「ppm」もパーツ・パー・ミリオンと呼ばれることはほとんどなく、普通は、「ピー・ピー・エム」と呼ばれる。ppm は、純ガスを取り扱う時に最もよく使用される濃度の単位のひとつである。

ガスの組成 (composition) や純ガス中の不純物の濃度 (concentration) を表わす値は、特にことわりがなければ、容積比 (volume fraction) である。容積比は、理想気体のモル比 (mole fraction) に等しいため、ガスの量の換算に都合がよいためである。高圧ガスの場合実際の気体を理想気体とみなすことはできないが、ここでは、換算のためだけに理想気体としている。また、濃度を容積分率と質量分率を区別して明示する必要がある時は、容積分率は vol.ppm あるいは ppmv などと示され、質量分率は wt.ppm、ppmw などと示される。

補足 1-2：液体の濃度と気体の分率

「濃度」とは、「溶液中の溶質の割合」を示す学術用語であり、SI では、質量濃度 $[\text{kg}/\text{m}^3]$ 、物質質量濃度 $[\text{mol}/\text{m}^3]$ 、体積濃度 $[-]$ などが定義されている。気体の場合は「体積濃度」という用語は使えず、「体積分率」が用いられるが、これは両者の定義が異なるためである。

溶液の体積濃度は、溶質の体積を混合後の液体の体積で割ったものであり、気体の体積分率は、混合ガスの体積が、混合前の全ての成分の体積の合計に等しいと考えて、これを分母にして各成分の体積をとしたものである。混合溶液の「体積濃度」と混合気体の「体積分率」は考え方が異なっており、厳密には、混合気体に「濃度」という用語を用いるのは正しくない。液体は溶け合うが、気体はそうではないと考えて、前者は濃度、後者は分率と定義しているためである。(これは気体を理想気体と考えた場合であって、厳密には正しくはない)

しかし、慣用的には「気体の体積分率」を「ガスの濃度」と呼ぶことが多く、ガス中濃度といったときは、普通は気体中の体積分率と考える。空気をはじめ、ほとんどのガス・混合ガスの組成の表示には、容積比 (体積分率) が使用されている。なお質量分率は、使用頻度が低いことと、体積分率と分子量から容易に換算できることから、物性表や成分表へ記載されることが少ない。

「1ppm」を図示してみる。棒グラフで示すことができるのはせいぜい1桁から2桁まで、それ以上の比率は、図示しても分からないため、桁が異なる数値を図示する場合、棒グラフの代わりに面積図が利用されることがある。しかし、1ppmであれば6桁であるから、面積表示も難しい。ここでは立体で図示することにする。

図 1-2-1 は、 $100 \times 100 \times 100$ 個のボールを含む立方体である。3 面が見えているので、3 万個のボールが表面に見えるが、この中には 100 万個のボール入っている。

純ガス中の 1ppm の不純物とは、この 100 万個のボールの中に入ったひとつだけ異なるボールがあるということである。そろばんのような 10 進法のデジタルであれば 6 個目のそろばんの玉をひとつを動かせば 100 万分の 1 ということになるが、実際にガス分子を並べてみると大変である。

図には、たまたま異なる分子ひとつが表面に見えているように描いてあるが、1 個の分子は、この箱のどこか奥の方にあるのかも知れず、しかも実際のガス分子は激しく動き回っているので、これをとらえて分子を一個ずつ数えて 100 万個にひとつの違いを見つけることはできない。

通常の容器の中のガス分子をひとつずつ数えることは不可能であるから、「不純物濃度 1ppm」を求めるために、

個数を数える以外の様々な計測方法（分析方法）が発明され、分析装置が開発されているが、実際の測定は、分析装置があれば誰でも簡単にできるというものではない。測定の仕組みを理解し、正しい手順でサンプリングし測定を行うための熟練が必要である。

1ppm は数字にすると簡単であり、産業ガスの業界では、日常的に用いられる単位である。しかし 100 万分の 1 は、図にすると非常に微量であることが分かる。さらに微量な不純物成分であれば、ppb (parts per billion) や ppt (parts per trillion) といった小さな単位が使われることもある。ppb であれば、図の立方体 1000 個の中からボール 1 個を探し出すということである。

ある容器の中に非常に純度の高いガスが入っている時、この中に 1 つも異なる分子が入っていないということを証明することは極めて難しい。

たとえば、標準的な 47 リットルの高圧ガスの容器には、14.7MPa の圧力のガスが充填されており、これはおよそ 310 モルのガスであるから。これにア

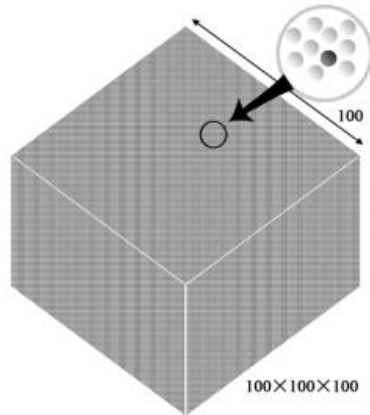


図 1-2-1- 100 万個のボール (図中の○) が入った立方体、
100 万分の 1=1ppm

ヴォガドロ定数を掛けると、ここに、含まれるガス分子の数は 1.8×10^{26} 個である。もし「100%」を標榜するのであれば、この膨大な数のガス分子の中に異なる分子がひとつも検出されないということである。100%に限りなく近い高純度のガスが用意でき、非常に高感度の分析計があったとしても、100%を証明するという事は困難である。

販売される産業ガスは、配管や容器の中にあり、客先では容易に中身を調べることができないため、ガスには、分析票（分析表）が添付される。製造されたガスの極一部をサンプリングして実際に分析した結果が、容器ごとに示される。ただし、高感度のガスの分析を行うには、多くの時間とコストがかかるため、全ての製品に対して詳細な分析表が添付される訳ではなく、一般ガスと呼ばれるグレードでは、全容器に対して分析票が添付される訳ではない。前述の表に示すようなハイグレードの純ガスの場合は、想定される様々な不純物について分析結果が示され品質が保証されるため、その分コストがかかる。

また、高純度ガスの品質を保証するといっても、ありとあらゆる成分を分析するという訳にはいかないため、どの不純物を、どの程度の感度と精度で測るのかは、ガスのグレード、ガスの製造プロセス、分析を含むガスコスト、ガスの性状（液体、気体）、利用者が必要とするガスの品質などから決められる。条件によっては、前述の表に示した不純物以外のガス種、微小なゴミ、金属、酸、微生物などが測定対象となることもある。同じ製造法で作られたガスであっても、不純物の測定対象が増えるほど、コストがかかり高価なガスになる。

純ガスの純度を分析結果の数字によって示し、「極めて100%に近い高純度」であることを保証することはできるが、これは100%を意味するものではない。どこまでいっても100%を証明することは不可能であるから、「高純度ガス」とは、非常に不純物が少ないことを品質保証された「100%に近い純ガス」である。責任を持ってこのような値を表示するには、高感度・高精度の分析設備が必要であり、サンプリングや分析計の操作、校正、分析作業には、専用の設備も必要となり、熟練した作業者の知識、技能、ノウハウが必要である。示される分析保証値が信頼されることが、ガス屋にとって最も重要な信用である。

特定の同位体を濃縮したガスの場合は、モル分率（mole fraction）に加えて、原子比率（原子分率、atomic ratio、isotopic ratio、atom %など）の表示が必要

となる。通常の純ガスは、「同位体混合物」であり、同位体純物質 (isotopically pure material) ではない。一般的に販売されている「純ガス」の同位体の比率は明示されておらず、製造方法や原料によって同位体比率は異なり、天然存在比 (natural abundance) から大きく異なっていることもある。

補足 1-3 : parts-per 表記の単位と課題

%、ppm、ppb などは「parts-per 表記法」の一例であるが、国際的には様々な議論がある。国際度量衡局(BIPM)は parts-per の使用を認めてはいるが、言語に依存する大きな問題があるため、正式な SI には含まれていない。

西洋の命数法 (numeral、数詞を用いた数の表わし方) には、long scale と short scale があり、言語によって採用されるものが異なり非常に複雑である。たとえば、ppb の b は英語圏では billion のことであるが、short scale では 10^9 を表わし、long scale では 10^{12} を表わす。short scale は billion、trillion、quadrillion と 3 桁毎に呼び方を変えているのに対して、long scale は、million、billion、trillion の間に thousand million、thousand billion を挟むため、6 桁毎に呼び方が変わる。

昔の英語圏では、米国が short scale、英国が long scale であったが、戦後間もなく国際度量衡総会は long scale の方を推奨、フランスなど多くの国が long scale に移行した。その時、米国は short scale のまま留まり、英国が逆に short scale に移行したため大きく混乱した。現在は、英語圏の多くの国とロシアなどの東欧が short scale を採用、ドイツ、フランス、イタリアなど一部の国が long scale である。

日本語の小数 (分、厘など) と大数 (万、億など) は、中国に由来する東洋の命数法であり、西洋の命数法とは直接関係はないが、ppb、ppt を導入しているので西洋式の命数法にも注意が必要である。

現在、日本でよく使われている ppb、ppt は、short scale のものである。われわれが使っている%や ppm までは、ほぼ万国共通であるが、ppb や ppt は万国共通というものではなく short scale の国でしか通用しないということである。

このような parts-per 表記は、国によって数字の読み方が異なるため、混乱を招きやすい。国際度量衡局は ppb、ppt を使用しないように提唱、アメリカ国立標準技術研究所(NIST)も言語に依存する用語として使用に反対している。SI と ISO では、パーセントについては使用を認めているが、他の表記

は正式には認めていない。parts-per 表記を廃止すべきとの意見もあるが、工学分野では多用されており、parts-per 表記に代わる方法も提案されていない。産業ガスの業界としては ppm や ppb の使用を禁止されると、非常に面倒なことになる。また、パーセントについては、工学だけでなくあらゆる分野に普及しているので、廃止は極めて難しいと思われる。

なお、パーセントや ppm は、比率を表わす parts-per 表記法であり、差を表わす数字ではないことに注意が必要である。たとえば、消費税の税率が本体価格の3%から5%になった時、元の税率は1.67倍、すなわち67%も上がっている。「税率が2%上がった」という誤用が時折みられるが、変化量を差で示す場合は、パーセントは使えないので「2ポイント上昇」としなければならない。不純物の濃度が10ppmから15ppmになった時は、不純物は5ppm増えたのではなく、1.5倍、50%増えている。

補足 1-4： ppm よりもはるかに微量の計数

ppm は100万分の1、ppb は10億分の1、ppt は1兆分の1であるが、放射性物質の量は、放射線の量から求めることができるため、さらに桁外れに微量の値が測定できる。放射性物質の量（放射能）は、その崩壊係数（半減期あるいは寿命など）から比放射能（質量あたりのベクレル）が得られるので、放射線の測定値（ベクレル）を与えると、放射性物質の濃度（重量分率）が求められる。たとえばセシウム134であれば1ベクレルあたりの重量は 2×10^{-14} gとなるため、水1リットル中にセシウム134が100ベクレル含まれるとした場合の化学種としての濃度は2pptのさらに100万分の1となる。逆にみると1リットルの水に1兆ベクレルのセシウム134が含まれていた場合に、やっと2ppmという化学分析できるということである。放射線の計測は桁外れに高感度である。微量であっても環境への影響があるとされる放射性物質の処理の難しさが分かる。（「2.5.5(4) 半減期・寿命・比放射能」）