

はじめに

われわれは、「産業ガス」を製造し顧客に供給する「ガス屋」である。ガスの科学は、古くは17世紀、錬金術から化学が生まれるきっかけとなった真空と空気の研究から始まり、その時に作り出された「圧力」の概念、それから1世紀半後に作り出された「温度」の概念へと発展、その後、実在する気体の研究が進み、液化技術、分離技術の進歩、新元素の発見へと続き、20世紀初頭に現われた現代物理学（量子論と相対論）によって、ガスの科学はガスの化学やガスの応用技術として確立されてきた。

急速な科学の進歩とすぐに行われたガスの工業化によって「産業ガス」事業が興り、わずか100年のうちに現代社会に必須の産業となった。鉄鋼も化学も半導体も、その他多くの産業や社会サービスが産業ガスなしには成り立たないようになった。ところが、過去の100年の技術の変遷を振り返ると、100年後、200年後、この産業が今と同じように必要とされるかどうか予想することはできない。

しかし、われわれ、ガス屋がGas Professionalsであり続けられ、技術や経験・ノウハウは、100年後も、きっと何かの役に立っていると思う。

0. はじめに

0. 1 このテキストの目的

われわれは、「ガス屋」であり、Gas Professionals を目指しつつ、顧客にガスとガスのアプリケーションを提供している。最も重要なことはガスの品質と安定供給であり、そのために様々なプロのガス屋が必要である。ガスの製造装置や供給装置の設計・製作、これらの機器のオペレーション、ガスの供給、ガス・アプリケーションの提案と顧客の問題解決、事業継続のための経営や研究・開発など、ガス屋特有の仕事がたくさんある。同じガス屋の中にも様々な職種があるが、外から見れば同じガス屋でありガスのプロである。

産業ガスは、20世紀初頭に生まれた新しい科学・現代物理学の成果に基づいて興った産業のひとつである。製鉄や製塩、土木・建築など古くからある産業に比べると、非常に新しい産業であり、電気・電子機器や半導体などの新産業と同じように古い科学だけでは成り立たない分野である。したがって、ガスを取り扱うということは、最新とはいかなくとも、少なくとも20世紀の科学の知見が必要である。しかし、日常の業務の中では、なかなか「ガスの科学」を点検する機会がないため、非常に古い科学で止まったままの人も多いようである。

気体の圧力は、17世紀にロバート・ボイルが「発明」した。温度は、18世紀にゲイ・リュサックが「発明」した。温度や圧力は、人間が発明した概念であり、圧力はボイルの法則、温度はシャルルの法則として高校までの授業でも習う。19世紀には、トマス・ヤングがエネルギーの概念を発明し、温度、圧力、エネルギーが揃って、熱力学という科学と工学にとって必須の学問が発達し、空気の液化や分離技術につながった。

多くの人知っているであろうボイルの法則とシャルルの法則は、理想気体の法則である。しかし、理想気体は液化しないので、われわれが知っている液体空気や液体窒素と理想気体の概念は相容れないものである。理想気体の法則や概念は、先人たちが大変な苦労を重ねて発見し、確立したものである。実際には存在しない理想気体であるが、それは非常に重要な概念であり、ガスの科学の基礎である。しかし、それは19世紀以前の科学であり、われわれの産業の基礎ではない。20世紀初頭にマックス・プランクが提唱した量子論とアルバート・アインシュタインが提唱した相対論

が、科学を変え 20 世紀の世界を変えた。現在、未解決の課題はあるものの、これらの現代科学（物理学）は 20 世紀の中盤にはほぼ確立、その基礎の上にガスの科学も確立、産業ガスの技術はほぼ半世紀前に完成した。

空気分離の技術は、ほぼ 100 年前にリンデやクロードらによって発明されたものを基本とし、半世紀前にカピッツァが確立したプロセスから大きくは変わっていない。細かな改良・改善、新分野へのガス供給への対応などを除くと、ほぼ半世紀、ガス屋の基盤技術には大きな変革がない。非常に安定しているとも言えるが、ガスの製造（分離・精製・混合）や分析などの技術は「ブラックボックス化」され、最も重要なはずの「ガスの物性」にも大きな関心が払われなくなってきているのも事実である。

もちろん、ガス屋の中にも様々な仕事・役割があり、全員がガスの製造方法や分析方法を「熟知」している必要もないが、Gas Professionals の一員であれば、それなりに知っておかなければならないこともある。プロのガス屋として最も恐れるのは、顧客へ嘘を伝えることである。人間誰しもミスは起こしてしまうので、近年は誤字・脱字のエラーはなくなる。しかし、ガス屋を標榜する人間が間違っただけのガスの情報を発信することだけは避けたいと思っている。

Gas Professionals は、高圧ガス保安法に基づく製造責任者や販売主任者の免状を取得している。ひととおりのガスの知識と現場の経験を持っており、一般の人とは違うプロのガス屋である。しかし、そのプロのガス屋でも、時には大きな勘違いをしていたり、知識が欠落していたりすることがある。もちろん、日常の業務は、安全と品質と安定供給を第一に行うためのルールやマニュアルがしっかりしているので、ガス屋の世界では大きな勘違いは起こらないような仕組みが作られている。しかし、そのようなノウハウだけでは理解が十分ではないと考えることもある。

ガス屋の新人教育のカリキュラムの中で、酸素や窒素の製造方法を教えることがある。全員が空気分離の現場（装置の製作と運転）に関わる訳ではないが、この仕組みを理解することが、事業全体を理解する上で必要な知識のひとつだと思われるからである。ガスは目で見えず、製造装置の中で起こっていることも見ることはできないが、これをブラックボックスとしてしまっただけでは、ガス屋としては何か足りないのである。

このテキストは、今一度、ガスの科学を勉強しなおすきっかけを提供することを目的にしている。

0. 2 産業ガスの事業 (industrial gas business)

産業ガス事業の祖業は、空気を原料とした酸素ガスと窒素ガスの製造である。空気を分離して酸素ガスと窒素ガスを製造する技術は、20世紀初頭に欧州で発明され、すぐさま、米国と日本にも伝わり、「酸素ガス会社」が起業され、「工業ガス」(industrial gases)を供給する産業が興った。

工業的に生産される酸素は、鉄の溶接・溶断に用いられ、次に、酸素吹き込みによる製鉄(転炉)に使用されて、大規模な鉄の生産が行われるようになった。大量の鉄の生産は、近代国家の工業化を進めた。酸素は、重化学工業の素材となり、酸素と同時に生産される窒素は化学肥料、化成品、電子機器の産業の重要な素材となった。また、医療用のガスの利用も行われるようになり、日本では、工業用のガスと医療用のガスを合わせて「産業ガス」と呼ぶようになった。

空気は、地下資源や水資源、生物資源などとは異なり、どこの国・地域であっても全く同じ組成の空気が入手できる最も公平な地球上の資源であり、産業ガス事業は、この世界中のどこでも入手が可能な空気を原料とするガスの製造・販売を基本とするビジネスであり、空気を原料としてこれを分離して製造される「セパレートガス」、この技術から派生した混合ガス、超高純度ガス、およびガスの物性を利用したガス・アプリケーションから構成されている。

石炭などを反応させて製造されるガスを「合成ガス」と呼び、地下資源として産出・生産されるガスを「天然ガス」と呼ぶ。合成ガスと天然ガスは、工業用・産業用の燃料ガス、原料ガスとして定着、非常に大きな産業規模となっているため、これらのガスを単に「ガス」と呼ぶことが、非常に広範に普及している。

そのため、産業用に用いられるガスから、合成ガスと天然ガスのような燃料ガス・化学原料ガスを除いた残りのガスを「産業ガス」と呼ぶようになっている。

一般には、都市ガス供給会社やLPG販売会社が「ガス会社」「ガス屋」だと思われているが、産業ガスに関わる事業者も自らを「ガス屋」と称している。

20世紀になって、全ての気体は、液体にすることができるようになり、「都市ガス会社」も「産業ガス会社」も「液化ガス」を商材あるいは輸送・

貯蔵手段としている。都市ガス業界も産業ガス業界も、ガス屋であるが、実際は、気体も液体も取り扱っている。

科学的には、液体の物質と気体の物質には区別がなく明確な線引きができない。しかし、工学的には、常識的に液体と気体をその時の条件によって決めることができ、ガス屋は、ガスも液体も取り扱う。

液体と気体が区別がつかないとはどういうことかと言うと、そもそもの定義にあいまいな点があるということである。液体は気体に比べると圧縮されにくい、それは程度の違いであって全く圧縮されないという訳ではない。圧縮性・非圧縮性というのは、工学的な取り扱い上の区分であって気体と液体の性質を表わしているのではない。液体と気体は、自由に形状を変えるという点では全く違いがなく、容器に入れていなければ拡散してしまうが、どのくらい遠くまで広がるかも程度の違いだけである。液体は重いとか、気体は軽いとか言ってもこれも程度の問題であって、これ以上重いものを液体とするという定義がある訳ではない。同じ物質を同じ状態に置いて比較した時はじめて、どちらが液体でどちらが気体と呼ぶことができる。

「普通環境（常温・常圧）」の酸素は、気体であり、酸素ガスあるいは単に酸素と呼ぶ。液体の状態の酸素は「液体酸素」と呼ぶ。液体酸素の容器の中には、（地球上であれば）下の方に重い流体があり、上の方に軽い流体があり、重い方を液体酸素、軽い方を気体酸素と呼ぶことができる。気液が共存している状態では、容易に気体と液体を区別できる。

商品としての液体酸素は、日本の法令では「液体酸素」ではなく「液化酸素」と呼ぶ。酸素は「普通」は気体であるから、人為的に液化されたという意味で「液化ガス」という言葉が生まれた。貯槽やタンクローリーには「液化酸素」「液化窒素」「液化アルゴン」などの表示がある。酸素は気体、水は液体と決めたのは人間（の環境）であり、人間中心主義はあまり科学的とは言えないが、液体酸素は「液化酸素」、蒸発した水は「水蒸気」と呼ぶのが慣わしである。

主成分がメタンである天然ガスは、使用時は、「天然ガス」（NG、natural gas）、輸送時の液体状態は「液化天然ガス」（LNG、liquefied natural gas）と呼ばれる。天然ガスは、採取された状態では気体であり、その一部は貯蔵・輸送のために液化され、液化天然ガスになる。「液化」は人為的操作、「天然」は地球の地下から湧き出ていることを示し、「ガス」は採掘時の性状を示している。採掘そのものは、人為的なものである。

人間は、空気を呼吸している。微量であっても人体に有害で大きな影響を与えるガスを持に「毒性ガス」と呼んでいるが、基本的に、大気圧の空気以外のガスは全て呼吸に適さないものである。

産業用の多くのガスが毒性ガスであり、この他に窒息性のガスや可燃性のガスが多くあり、産業ガスの商材は、治療用の医療ガスを除くと、一般的には人間にとって有害あるいは危険なものである。したがって、多種類のガスを取り扱う産業ガスのビジネスには、相應の危険、取扱い上のリスクが伴う。基本は空気を原料とした産業であるが、危険は多い。これは、化学産業やエネルギー産業など全ての産業で同じことがいえることであり、産業用の液体や気体は人間に対してけっして安全なものではない。

一般に供給されている産業ガスは、地表付近の大気圧よりもかなり高い圧力で保管・輸送・使用されている。圧力の高いガスは、取扱いを間違えると非常に危険なものであり、「高圧ガス保安法」という非常に厳しい法令の下で安全が保たれている。これまでも、蒸気機関、内燃機関、電力機器が発明されて新しい技術が文明を支えてきたが、これらの新技術が普及する過程では、多くの事故に遭遇、これを乗り越えて今日の安全が保たれている。産業ガスの歴史（高圧ガスの歴史）も、多くの困難な状況を乗り越えて、安全な取扱いを可能としてきた。高圧ガス保安法もかつては「高圧ガス取締法」と呼ばれ、取締りが必要なもののひとつであった。

日本では、高圧ガスの安全を保つため、無資格・無許可でガスを圧縮し液化し、販売することを禁じている。産業ガスの業界は、高圧ガスの業界であり、産業ガスの会社は、これらのガスを安全に取り扱う専門知識・技術・経験を持ち、安全に安定供給する体制が確立されている。

産業ガスの業界は、高圧ガス、毒性ガス、可燃性ガス、反応性ガスなどを産業用（鉱工業、農林水産業）に供給し、呼吸ガス、麻酔ガス、検査ガスなどを医療用に供給している。ガスの安全な取扱いは、誰にでも簡単にできるものではないので、「プロのガス屋」が存在する。危険なガスを安全に取り扱うために Gas Professionals が必要である。

0. 3 ガスの化学

われわれは、日常の業務の中で、ガスを圧縮し、冷却、液化し、分離・精製・分析を行っている。学習や訓練によって、その取扱い方法が身に付いているので、なぜ液化するのか、どうして分離が出来るのか、といった理由を知らなくても、普段は、特に困ることはない。

「ガスの化学」は、主に 19 世紀末から 20 世紀初頭にかけての科学技術の成果から成り立っており、どのようにガスを取扱えばよいかという「ノウハウ」が確立している。基本的なガスの性質や取扱い方法は、高圧ガス関連の教科書やマニュアルに詳細が記されているので、特に難しく考えなくても、たいていの問題を解決できるようになっている。

しかし、「ガスの技術屋」あるいはガスビジネスに精通する”Gas Professionals”として信頼され評価されるためには、ガスを取り扱う方法 "know-how" だけでなく、その基本や理由 "know-why" を理解する必要がある。

特に生産現場や研究開発の現場の技術者は、目の前の課題を解決し、新たな発想や創意工夫を生み出す必要があるから、ガスを取り扱う方法を知っているだけでは十分ではなく、ガスの挙動、現象の本質、機器の中の仕組みなど、その理由を理解することが非常に重要である。技術者ではない事務方であっても、顧客の問い合わせに嘘を伝える訳にはいかないので、ガスに関する正しい知識や仕組みを理解しておかなければならない。

ガスを実際に取り扱うノウハウを「ガスの化学」だとすると、その仕組みノウハウは「ガスの科学」なのだと思う。化学と科学では、紛らわしいのでこのレポートでは、ガスの科学をガスの物理と呼ぶことにする。日常、何気なく取り扱っているガスをもう少し掘り下げて、ガスの物理を考えてみたいと思う人たち、特に新しくこの業界に入ってきた人たちに、考えるヒントを提供したいと思う。

0. 4 ガスの物理

ガスの化学ではなく、「ガスの物理」をまとめたいと思ったきっかけは、軽金属溶接協会誌に「アルゴンガスの製造」という記事を連載したことである。この雑誌は、アルゴンガスやヘリウムガスのユーザーである軽金属溶接の業界団体である軽金属溶接協会が発行するもので、ここに、ガスを供給する側からの寄稿の機会を得た。

アルゴンの製造法だけを簡単に説明することは困難であるため、その前段である深冷空気分離の説明から始めることとした。また同じく溶接に用いられるヘリウムガスの場合、資源も製造法もアルゴンとは全く異なるが、深冷の技術という点では共通点が多く、同じ産業ガスビジネスにおける取扱商品であるため、ひとつの記事に二つの希ガスアルゴンとヘリウムの説明と空気分離（酸素・窒素）の技術の解説を行うことになった。何とか異業種交流の役に立ちたいと考えたが、プロの教育者ではないため、短くまとめて上手に伝えるテクニックがなく、少し連載が長くなってしまったが、協会の編集委員会に協力して頂いて、何とかまとめることができたように思う。

この連載記事の中で、空気中のアルゴンは地殻中の放射性カリウムが崩壊して生成されており、地下の天然ガスの一部に含まれるヘリウムは地殻中のウランやトリウムが崩壊して生成されているということを書いた。アルゴンやヘリウムのユーザーである軽金属溶接の関係者にガスの起源について知って欲しいと思って書いたが、アルゴンやヘリウム、そして空気の起源を知ることは、ガスのユーザーにとっても意味があると考えたからである。

しかし、これらのガスを商材としている産業ガスの業界であっても、普段、その資源については、ほとんど意識されていない。ガス屋の仕事では、ガスの起源、元素の起源、地球上におけるこれらのガスの資源性について得に興味を持っていなくてもあまり困ることはない。アルゴンやヘリウムの起源、空気とは何か、その量は具体的にどのくらいあるのか、あまり真剣に考えることがない。

地下資源の場合、その成因を知ることは、探鉱や採掘の技術あるいは将来の資源量を正しく予測のために非常に重要な研究テーマであるが、これらの資源がどのようにして作られているのかが科学的に解明されていない。近年は、石油や天然ガスが化石層以外の地層から多く採掘されるよう

になっており、地下資源や海洋資源の実際の量や枯渇性を科学的に議論することが難しくなっている。

これに対して、空気とそこに含まれる酸素、窒素、アルゴンやその他の成分の成因は、科学的にほぼ解明されている。高校の地学の教科書には、宇宙や元素の起源、地球の大気の歴史が詳しく載っており、長い歴史の中で大きく変遷してきた地球の大気、酸素、二酸化炭素、窒素についても詳細な記録が示されている。

ところが、地学の教科書には、アルゴンの記述がほとんど見当たらない。空気中に1%近くも存在するアルゴンは、発見されてから100年以上たち、産業ガス業界にとって非常に重要なガスである。深冷空気分離装置では、アルゴンの存在を無視して設計することはできず、むしろキーコンポーネントとなっている。しかし、なぜか、アルゴンは、その存在が興味を引かないようである。一般の教科書だけでなく、産業ガスの会社の社内教育資料であってもアルゴンの起源についての説明がほとんど見あたらない。

軽金属溶接協会誌に寄稿した記事は、軽金属溶接の業界の方に向けて書いたものであり、目的は、アルゴンの製造の解説である。普段注目されないアルゴンも軽金属の溶接には欠かせないガスである。これは、絶好の機会でもあり、産業ガス業界の自らへ向けて、われわれの原料について少し興味を持って欲しいという気持ちもこめて記述した。

アルゴンやヘリウムのような地球上の希ガスは、放射性同位体の崩壊から生成されている。地球が冷えて固まっていない理由、熱源の3分の1は46億年前の創世記の原始の熱であるが、残りの熱は、地殻中のウランなどの重元素の崩壊とカリウム40の崩壊による原子の熱である。その結果、地殻中には大量のヘリウムが今も閉じ込められており、空気中には1%ものアルゴンがある。ウランは、地球表面上の、岩石、土壌、水中に満遍なく存在し、カリウム40は地殻中に大量に存在するだけでなく全ての生物の体内に常に一定量が存在する。

現在、多くの日本人は、放射性物質や放射線と聞くだけで、話題を遠ざける傾向があるが、自然界から放射性物質や放射線をなくすることは不可能であり、放射性物質の知識なしに空気やヘリウムの起源を知ることはできない。正しい知識と理解が必要と感じる。

産業ガスビジネスは、120年前に生まれた現代物理学（量子論、相対論）の産物のひとつである。

20世紀以降の科学は、自然をありのままにとらえることは、自然の本質

をほとんど見ていないということを示し、分子や原子や電磁波など、世界には人間の目には見えないものが非常に多くのものが存在することを明らかにした。それまで、仮想の粒子であった「分子」は、110年前にその存在が明らかになり、酸素ガスや窒素ガスという分子を販売する事業も興った。

量子的世界には、それまでの常識を覆す不思議な事実がたくさんあることが示された。現在、われわれが常識だと思っている多くの事柄が、この100年の間に明らかにされたものである。ガスの液化や電子技術など実に様々な産業技術が現代物理学によって実現した。19世紀までの科学では、ガスの液化もできず、現代物理学がなければ、産業ガスのビジネスも半導体産業もIT産業もなかった。

しかし、現代物理学を本質的な部分から理解するには、数学や物理学の基礎を必要とし、産業ガスの仕事を始める前に全てを学ぶことは不可能である。そのため、ガスの性質を「結果」として示し、その利用方法を学ぶ「ガスの化学」があり、「ガスの利用技術」や「ガスの知識」といった実学のテキストが作られている。仕組みを理解していなくても、まずは、安全に取り扱う方法を知識として学び、ガスを取り扱うことが非常に重要である。

一方で、産業ガスを基礎的な物理の観点から説明する平易な教科書はほとんど見当たらない。産業ガスや空気分離が特殊な分野であるため、産業ガスからみた物理の解説書、ガス屋のための解説本が見当たらない。「ガスの化学」や「ガスの利用」の教科書はあるが「ガスの物理」の教科書がない。

物理学は、自然科学の基礎であり、世の中の事象の「何故」にできるだけシンプルな答えを出すために存在している。できるだけ簡潔に、できるだけ少ない理論や法則で自然を説明することが重要であり、基本的には数学で記述されている。物理学の上に、より複雑な基礎科学である化学がある。観測や経験に基づいて様々な事象を説明する点では物理と同じであるが、化学は、分子レベル以上の科学であり、非常に複雑であり、全てを記述・解法することはできていない。

基礎科学の上には、応用科学、工学があり、その技術を応用した産業がある。

産業ガスの事業は、経済の世界では「化学系」産業・企業とされているが、基盤技術は、化学のような複雑な系ではなく、より単純な物理系の技

術である。基礎工学が基本であり、化学や生物学のような複雑な説明を必要としていないので、本来ならば説明が非常に簡単で分かりやすい技術領域である。

たとえば、空気を分離して酸素を製造するための「蒸留操作」は、化学工学における「単位操作」のひとつであり、化学反応ではなく、物理現象（物性）の応用である。蒸留操作は、非常にシンプルな系であり、物性推算と基本の方程式（物質収支やエネルギー収支）だけで記述できる。実際の深冷空気分離装置の設計・製作・運転には、少々、ノウハウも必要であるが、合成や分解といった複雑な化学反応を伴わないため、計算と現実装置の乖離は非常に少ない。深冷空気分離装置は、化学プラントというよりは機械装置に近い。産業ガスの会社が保有する技術は、反応や合成、新素材の開発、新薬の開発といった化学に精通した会社の技術とはかなり異なり、基盤技術は「機械物理系」と表現することもできる。

ここでいう、ガスの物理とは、高校の理科や大学の物理の講義で習う程度のものであり、難解な数学や理論を駆使する大学の物理学科の物理が必要ということではない。難しい物理学の問題は、およそ 100 年前から偉大な天才たちが解明してきたので、その結論を勉強してガスを取り扱えばよいということであり、ガスの化学（ノウハウ、実務）に少しだけ、ガスの物理学（ノウファイ、理論）が加わればよいと考える。ノウハウを身に付け、ノウファイを理解すれば、ガスを正しく理解することができ、ガスの応用技術が広がっていく。

0. 5 正確な情報を伝えるということ

インターネットの普及で、それまでニッチであった産業ガスも、いくつかの検索キーワードで産業ガス関連企業のホームページ（Web site）上の解説記事にたどり着けるようになった。

しかし、検索を試みたところ、産業ガス、酸素や窒素の説明に関して次のような記述をみかけた。（ほぼ発見時の原文のまま）

- ①「空気分離装置では、空気をマイナス 200℃以下の超低温で分離する」、
- ②「産業ガスは、酸素と窒素の沸点差を利用して空気を分離して作られる」、
- ③「アルゴンは、・・・その割合は空気組織のわずか 0.94%という貴重なガス・・・いかなる条件下でも他の物質と反応しない完全不活性という特性を持ち・・・」。

これらの記述は、明らかに間違っているのだが、細かいことをいわなければ、これでもよいという主張もありそうである。企業のホームページの記事だから、この程度でよいと思うか、いやできるだけ正確であるべきだと思うか、人によって考え方は異なると思う。正確さを求めて、意味が伝わらないのでは意味がないという主張にも一理あるが、私は、不正確な情報は読者に対して失礼であると思う。

最初の「マイナス 200℃以下」という数字の問題は、大げさにいうと、「 $\pi=3$ 」問題に似ている。

「学校では円周率を3と教えている」と報道され、一時大きな話題になったことがある。2002年の「円周率3騒動」。

「円周率 π は、本当は、 $\pi = 3.141592 \dots$ という無理数だが、暗算する時は3でよい」というのが本来の趣旨であったが、これが、今の学校では、円周率=3と教えていると報道（誤報）された。この問題が、大きく取り上げられたのは、算数や数学は、答え（数字）が合ってさえいれば、それでよいというのではなく、もっと大事な理論や本質がある、と多くの人が考えたためである。

「ネイピア数 e は、 $e = 2.71828 \dots$ であるが、だいたい3である」というのもある。よく知られているオイラーの式（公式） $e^{i\pi} = -1$ は、美

しく不思議で奥深い数学の公式である。この他にも $e^{i\theta} = \cos\theta + i\sin\theta$ などの表現もあり、この公式は、人類の至宝とも言われ、式ひとつで一冊の本になるほどである。(吉田武「オイラーの贈物 人類の至宝を学ぶ」ちくま学芸文庫、2001年など)。

それぞれ、無関係なはずの自然対数の底ネイピア数 e と円周率 π と純虚数 i は、オイラーの公式でみごとに結びつき、この不思議な関係を目にすると、ネイピア数や円周率は特別な数であって、ちょうど3であってはならないと考えてしまう。虚数も人間が作ったものではなく、もともとあったようにも見えてくる。

要するに、ネイピア数と円周率は、誰にとっても特別な記号、特別な数であり、いくら断り書きを示しても、 e や π をこれ以外の記号で表すこともできないし、いくら3に近くても3にはできないということである。

深冷空気分離装置で空気を蒸留して酸素や窒素を製造するわれわれにとって、窒素の沸騰温度 77K (マイナス 196°C、圧力 101kPa における値) という数字は、非常に重要な数値である。円周率やネイピア数と比べると、大げさかも知れないが、業界の人間にとっては、この数字は非常に重要な数字であって、いくら丸めても「マイナス 200°C 以下」とはならないのである。

深冷空気分離装置の中で最も温度が低い部分は、高純度の液体窒素が存在する部分であり、その温度は窒素の沸騰温度(蒸気の飽和温度)である。通常、装置は、その時の気圧より高い圧力で運転されるので、最も低い温度は、標準大気圧の窒素の飽和温度「マイナス 196°C」よりは、いくぶん高い温度、およそ 80K (マイナス 193°C) である。タンクローリーや貯槽の中の液体窒素もマイナス 196°C よりはおそらく温度が高いと思われる、デュワー瓶(低温液化ガス用の断熱ジャー)に注いだ大気圧下で沸騰する液体窒素もおそらくマイナス 196°C になることは滅多にないと思われるが(大気圧はちょうど 101kPa にならないので)、さすがにマイナス 200°C 以下はありえない。

酒の「-196°C 製法」のコマーシャルで、この数字が一般にも広く知られるようになったのは、「液体窒素」の標準沸点の温度として知られたためである。空気分離の温度とは、全く関係のない酒のCMでも、この半端な数字を丸めてマイナス 200°C とはしていない。産業ガス業界を外から見たときの科学リテラシーはよく分からないが、どうやら -196 は、特別な

値とされているようである。

前述の説明文のように、「マイナス 200℃以下」としても、数値としては大きくは間違っておらず、「超低温」を強調しようとする、こういう表現が許されると考えたのかも知れないが、この数字で深冷空気分離装置を説明するのはあまりにも乱暴である。円周率を3にするのと同じような違和感を覚える。この説明からは、読み手に正しい情報を伝えようという意図や努力が感じられない。

2番目の、蒸留分離の仕組みを説明する「沸点差で分離する」という記述は、もう少し問題が複雑である。

正しい説明は面倒だから、このように書いたのかも知れないが、これを読んだ人は、本当に「沸点差」というもの（物理量）があって、それによってガスが分離されると誤解する可能性が高い。

純粋な酸素や窒素には、それぞれ異なる「沸点」という物性値がある。同じ圧力であれば、窒素の方が酸素よりも沸点が低い。標準大気圧（101.3kPa）であれば窒素-196℃、酸素-183℃というのが業界の常識である。しかし、その差 13℃を「沸点差」と読むことはできない。沸点差という物理量はない。

蒸留プロセスを扱う現場では、分離のしやすさの目安として「沸点差が大きい」とか「沸点差がほとんどない」といった言葉を使うことがある。詳細な気液平衡のデータが手元にない時に、このような日常会話が行われる。しかし、沸点差という量は定義されず、それを利用して分離ができる訳ではないので、このような表現が間違っ表に出ると嘘を広めることになる。

本来の「差」には、意味がある。

固体中では、温度勾配によって熱が伝わる。熱流束が温度勾配に比例する熱伝導の法則（フーリエの法則）があり、もし温度勾配が直線的であれば、2点間の「温度差（temperature difference）」が「熱伝導」の推進力となる。

流体が壁（固体）と接している時は、流体と壁の「温度差」を推進力として熱が伝わる。これを「熱伝達」あるいは「伝熱（heat transfer）」と呼ぶ。

流体の境界膜、流体と壁の間に熱抵抗があり、温度勾配と熱流束が比例するという関係が成立する。熱流束が、流体の主流の温度と壁の温度の間の

「温度差」に比例すると考えると「境膜伝熱係数」を定義することができる。もう少し、マクロにみれば、流体と流体の間の「温度差」を推進力として「総括伝熱係数」を定義することができる。

厳密に言えば、温度差と温度勾配は異なるので、熱伝導や伝熱の推進力を温度差とするのは不正確かも知れないが、両者は値としても概念としても近いので、温度の差（2点間の温度の引き算）に物理的な意味を見出すことはできる。

同様の現象が物質移動（mass transfer）の場合にもある。

流体中の拡散移動流束は、濃度勾配に比例する（フィックの法則）。

熱伝導と同様に、濃度勾配を濃度差とみなすと、拡散移動流束は濃度差に比例するので、この場合は、濃度差が推進力となる。拡散流束と物質移動流束が、ほぼ等しい場合には、物質移動は濃度差に比例する。この他の物質移動として、強制対流では「圧力差」が、自然対流では、「密度差」（浮力）が推進力となる。

この他にも、電流が「電位差」に比例するなど、多くの移動現象が、ある物理量の「差」を推進力として起こると記述できる。

温度差、濃度差、電位差、圧力差などの「差」は、長距離の場合には意味を持たないが、近接している場合には、何らかの物理的な流束を生じる原因、推進力としての意味を持つことが多い。

一方、液体窒素の容器の中で沸騰している窒素の温度と、同じ圧力で液体酸素の容器の中で沸騰している酸素の温度は異なっている。しかし、その温度の差、「沸点の差」や「沸点の違い」は、分離のための推進力にはならない。蒸留分離とは、混合物中の異なる種類の分子の物性の違いを利用した分離方法であるが、それは、それぞれの分子が単独で存在している場合の物性と同じものではないから、「沸点差」という用語は定義することができない。伝熱における「温度差」や物質移動における「濃度差」に似ているが、言葉としての意味や物理的な意味を持っていないのである。

蒸留分離は、酸素と窒素という別々の物質の沸点の差ではなく、酸素と窒素の混合物の中に含まれる分子の挙動の違いを利用する。空気は、窒素、酸素、アルゴンが混ざった「混合物」であるから、空気の中に含まれている窒素（分子）は、空気の中の窒素であって、窒素の中の窒素と同じ挙動を示さない。

分子には個性がないので、どこにあっても窒素分子は窒素であるが、挙

動はいつも同じではなく、必ず周囲の分子との相互作用によって決まる。

もし究極の 100%の窒素が存在するならば、窒素分子の近くにある分子は必ず窒素分子である。混合物である空気の場合、その中の窒素分子の周囲には、窒素分子だけでなく、酸素、アルゴンの分子が存在する。窒素分子と窒素の分子の間に働く分子間力と窒素分子と酸素分子やアルゴンの間に働く分子間力は同じではないので、当然のことながら「窒素中の窒素」と「空気中の窒素」は同じ挙動を示さない。

原子や分子が宇宙空間にある場合は、非常に希薄なため、ほとんど単独で存在するが、地球のように物質が集まっているところでは、分子間の距離が近いので分子間力が働き、分子は、熱運動をしているにも関わらず、バラバラにならず、気体あるいは液体の、かたまりとして、存在することができる。分子の熱運動が大きく、分子間力が比較的弱く分子が自由に動き回れる状態が気体であり、分子間力が強く束縛が強い状態が液体であり、分子の結合力が熱振動よりも大きくなっている状態が固体である。気体が液化するときも、液体が気化するときも、それは、ひとつの分子の動きではなく、必ず周囲の分子との相互作用によって説明されなければならない。

気体の圧力を高く（分子間の距離を縮め）、温度を下げる（熱運動を小さくすると、分子間力が優位となって液化が起こる。ここでは、問題を単純にするために、臨界点のことは考えずに、「圧力が高く、温度が低いとガスの液化が起こる」、ということだけを考える。

低温で高圧になれば、気体の分子は周囲の分子との間の分子間力が強くなって液体になることができる。

したがって、空気を低温にして液化が始まると液体の空気ができる。この時、空気に含まれる、窒素、アルゴン、酸素の分子の間の力は同じではないため、それぞれの分子が均等に液化されることもないが、特定の分子だけが液体になるということもない。たとえば、空気の温度が下がっても、標準沸点が一番高い酸素の分子同士だけが強く結びついて液体になるということは起こらないのである。

気体と液体が共存し、見かけ上、圧力、温度、組成などが変化しない「熱力学的に平衡な状態」では、気体の空気の組成と液体の空気の組成は異なった状態が平衡である。蒸留分離は、その性質、気液平衡（VLE）を利用して分離している。

たとえば、窒素の標準沸点はマイナス 196℃であるが、ある圧力の空気がマイナス 180℃で液化すれば、その液体空気の中には、窒素の分子も含

まれているということであり、純物質の窒素が液化しないような高い温度であっても、液体空気の中には窒素分子が含まれているということである。

逆に、液体空気を加熱してもその中の窒素、アルゴン、酸素の分子が均等に蒸発していくことはないが、標準沸点が最も低い窒素分子だけが離れて気相中に蒸発していく訳ではない。液体空気から蒸発してくるガスは、窒素ガスではなく、酸素分子やアルゴン分子を含んでいる。

空気という混合物の液化や蒸発といった現象は、含まれる分子の種類によって別々に起こるのではなく、空気という混合物として起こる。したがって、ここにそれぞれの純物質の物性値、同じ圧力における「沸点」を持ち出して、それぞれを差し引きして求めた値を「沸点差」と定義しても物理的な意味を持たず、これで蒸留分離を説明することはできない。

この場合、「沸点」という学術用語を用いているために、沸点差という学術用語がまるで存在するかのように錯覚するが、沸点差は学術用語ではない。

ただし、一般的に「沸点差が大きい物質を組合せた混合物」は、「沸点差が小さい組合せの混合物」よりも分離しやすい傾向があるのは事実である。たとえば、窒素とアルゴンの混合物は、酸素とアルゴンの混合物よりも分離が容易である。

それぞれの沸点の違いと実際の気液平衡の違いが、同じ方向にあり、感覚的には合っている。この場合は、沸点というよりも、同じ条件における純物質の蒸気圧の比が、混合物になっても同じ割合になるという理想溶液から類推する方がまだ近い（これをラウールの法則に従うという）このような傾向が一般的に多いため、蒸留分離を「蒸気圧比を利用した分離」と説明することがある。

蒸気圧比による説明は、理想気体と理想溶液が前提にあり、実際の空気は理想気体ではなく、液体空気も理想溶液ではない。「蒸気圧比」による説明も正しくはないが、混合物であることを無視し、定義されない「沸点差」を用いる説明と比べると、はるかにましである。

「沸点差」が蒸留分離の難易度を示す傾向があると言っても、科学的な根拠や理論がある訳ではないため、「沸点差」があっても必ずしも蒸留分離できる訳ではない。「沸点差」が大きい物質が組み合わされた混合物系であっても、気相中の濃度と液相中の組成が等しく、分離ができないという「共沸化合物」の例も少なくない。

「沸点差」で、酸素と窒素を分離するという説明は、蒸留分離や空気分

離の仕組みを大きく誤解させる。沸点差で分離するのであれば、そもそも液体空気などというものもなく、蒸留塔も必要ない。気液平衡を利用するという説明は難しくても避けることはできない。

ウェブサイトに記載された3つめの例は、アルゴンに関する説明である。空気中のアルゴンの組成は、0.93%あるいは0.934%と示されるのが普通であり、重量分率であれば1.28%である。ここに示されている0.94%という数字の出所は不明であり、「空気組織」や「完全不活性」という用語も、事典から見つけることはできなかった。外国語の機械翻訳なのか、何故、このような言葉が使われているのか理由は分からない。

文脈から、「完全不活性」というのは、いかなる条件でも絶対に化合物を作らないという意味にとれる。しかし、アルゴンには、レーザー発振などに長く利用されている化合物があり、アルゴンが完全に不活性という事実はない。

希ガスは、元素が発見されてからまだ100年ほどであるが、化合物がないと思われたのは、ほんの初めの頃だけである。希ガスの反応性は、乏しいが絶対に化合物を作らないという常識は無い。希ガス化合物の存在はよく知られており、安定な化合物が多いキセノンに対してアルゴン化合物は不安定であるため作り置きができないが、レーザー発振に用いられるフッ化アルゴンは、原料ガスを用意しておいて、使用時に合成されている。(希ガス化合物については第3章で説明)。

不安定な物質が、容器では供給されずに、使用時に合成されるということは、アルゴン化合物に限ったことではなく、様々な物質にあることなので、化合物が不安定であるということと、化合物が存在しないということは全く別の問題である。「アルゴンは完全不活性である」という説明文は誤りである。

このような、空気分離や産業ガスの説明文を読んでいて思うことは、これを書いた人は、用語の定義や意味をきちんと調べて、相手に正しく伝えるように説明しようとしているのかという、疑問である。「 -200°C 以下」「沸点差」「完全不活性」といった言葉を使う時には、それをきちんと説明する必要があると考える。

0.6 正確な用語を使うということ

アルゴンに化合物があることは、非常によく知られているため、本を調べればすぐに分かることであり、「完全不活性」という間違っただ情報に惑わされることはない。しかし、産業ガスの分野は、ニッチであるから、深冷空気分離の仕組みなどは、教科書や百科事典から正しい解説を見つけることが難しく、インターネット上で何らかの情報が得られても、それが正しいかどうかを判断することは容易ではない。

高校生が、理科の自由研究でガスの製造方法を知りたいと思った時、産業ガス関連企業のホームページの情報を探し、信用してノートにそのまま書き写すかもしれない。大学の研究者や学生が、空気分離や産業ガスに興味を持てば、業界の情報をホームページから探した情報を参考にして論文に引用するかも知れない。情報が少ない分野であるため、信頼性の判定が難しいが、それなりの名前の産業ガス企業の情報であれば、そのまま信用される可能性も高い。産業ガス業界の企業のウェブサイトが、誤解や間違いの発信源になれば、その責任は重い。

よく分からない分野の情報の中から間違っただ情報を見抜く方法に、使用されている用語が正確であるか、その出典は確かであるかという確認方法がある。

「疑似科学 (pseudo science)」を研究する研究者や心理学者によると「疑似科学者」の一般的な傾向として次のようなものが指摘されるという。

①自分を天才だと考える②まわりの人を無知な大馬鹿者と考え③自分を不当に迫害された偉人になぞらえる④最も偉大な科学者や確立されている理論に攻撃的を絞る⑤複雑な専門用語を使って書く傾向があり、勝手に作った用語や表現を駆使する⑥数学が使われることがなく、論理的な議論が欠けている⑦検証への消極的態度⑧立証責任を他に転嫁する⑨論拠に一貫性がない、等々。

もともと、科学と疑似科学の境界ははっきりせず、分かりにくいものであるが、疑似科学者の傾向に関するこの説明は、何となく分かるような気がする。全てが当てはまることはないだろうが、いくつかの例については思い当たる。

新しい発見によって新しい科学が作られる時、新しい言葉も生まれる。

その時の科学では説明できない「未科学」が立証される過程で、造語が新語になることも少なくない。しかし、その場合は、権威付けや社会的コンセンサスが得られて、正しい用語が定義され、認知されるというプロセスがある。全く新しい用語というのはそう簡単にできるものではなく、言葉の作者には、それなりの覚悟と確信、科学的裏付けが要求される。しかし、疑似科学と言われるものの一般的な傾向として、勝手な用語を作り、その造語で正体不明なものを説明し、広めようということがあがるようである。

科学の間違いを正し、足りない部分を補うことは非常に重要であり、これまで幾度も科学を飛躍的に進歩させてきた。しかし、ニセモノが混じることにも少なくない。「非科学」「完全な嘘」「疑似科学」がある。

「非科学的 (unscientific)」なもの、科学の手法を用いず、証拠や理論というより、論法そのものが科学的ではない。したがって、比較的判断が容易といわれる。

「完全な嘘」の場合は、データのねつ造があったり、再現性のないデータによる偽の科学的事実に基づいていたりするため、検証に手間はかかるかも知れないが、インチキをしたという証拠さえ見つかれば、判定は簡単である。

「疑似科学 (pseudo science)」は、基本的には、科学的手法を用いていること、明らかなインチキは見られないことから、判別が難しいことがある。

たとえば、「永久機関」は、仕掛けが複雑なことが多く、「解釈の相違」、「科学的誤解」、「ニセ科学」「未科学」などが混ざる可能性があり、判断が難しいことが多い。通常は、熱力学の法則に反する永久機関は否定され、日本の特許庁は永久機関を認めていない。

疑似科学は、見抜くことが難しいため、悪徳商法に利用されることが多い。中には、立派な正業を営む一流企業が巻き込まれることがある。よく知られるのが日本で起こった「マイナスイオン事件」である。

そもそも「マイナスイオン」という用語は存在しないが、空気中の分子が過剰電子によって帯電しているものを「マイナスイオン」と称し、これの効用を謳う商品が販売された。

電子を放出して正の電荷を帯びた原子または原子団を「陽イオン」(positive ion) または「カチオン」(cation) と呼び、電子を受け取って負の電荷を帯びた原子、原子団を「陰イオン」(negative ion) あるいは「アニオン」(anion) と呼ぶ。「マイナスイオン」という言葉は、和製英語な

のか、誰かが作った造語なのかははっきりしないが、どこことなく陰イオンに似ている。しかし、学術用語ではない。かつて「マイナスイオン」という言葉が氾濫したことがある。

日本語版ウィキペディアの「マイナスイオン」からリンクされる英語版ウィキペディアは、"negative air ionization therapy"「陰イオン化された空気セラピー」というタイトルに飛ぶ。英語版の説明では、「非医薬品治療であって、高投与は偽薬 (placebo) よりはましで、低投与の場合はそれもない」と説明している。

気象学の大気電気学分野では、大気中に存在する気相のイオンを大気イオンと呼び、空気が絶縁体でないことを説明している。また、コロナ放電で生成した大気イオンを用いる集塵機や帯電除去などの応用技術があるが、これも「マイナスイオン」とは関係がない。

将来、「マイナスイオン」を定義する学会や団体が現れる可能性が全くないとはいえないが、少なくともマイナスイオンブームの時に使われた「空気のマイナスイオン」は、正しい科学用語ではなかった。

空気に「マイナスイオン」や「オゾン」を発生させる「健康機器（イオン発生装置）」が米国に現われたが、1960年代に米国食品医薬品局 (FDA) が、安全性や効用に対して警告を発したために一旦市場から消えてしまった。

2000年頃に日本のマスコミ（特にテレビ番組）が「マイナスイオン健康論」を喧伝し、日本にマイナスイオンブームを引き起こした。「マイナスイオン」を発生する空調機、ヘアドライヤー、掃除機などの家電製品、自動車用品、パソコン、繊維製品、書籍など様々な「マイナスイオン商品」が開発され、市場に現われ、流行が過熱した（2002年）。

このブームには、家電メーカー10社以上が参入し、「マイナスイオン効果」を謳う商品が発売された。機器を製造・販売するメーカーの中には、脱臭、保湿などのデータを保有するところもあったようであるが、健康に関する臨床実証が実際に行われたのかは定かではない。この時、20世紀初頭にあった「大気の陰イオンの生物学的影響に関する研究論文」がマスコミに利用されたとされた。空気の「陰イオン」と「マイナスイオン」が同じものを意味するのかどうかははっきりとしていなかったが、何といても「マイナスイオン」という言葉が正式に定義されていない造語であるため、メーカーによってその言葉の意味や具体的な内容は全く異なっており、「マイナスイオン」は、何か特定の物質を指すものでもなかった。

効用が科学的に証明されていない商品が販売されたため、(独)国民生活センターが、消費者や事業者の意見調査を実施、「マイナスイオン機器」の流通を問題視した政府機関、公正取引委員会(改正景品表示法)や厚生労働省(薬事法)が事業者に対する行政指導や行政処分を行ったため、効能表示が撤回された。その後、商品そのものの販売中止が相次ぎ、マイナスイオンブームは沈静化していった。

当時は、「マイナスイオン」を正しい学術用語だと思って疑わなかった消費者が多かったため、用語が独り歩きし、商業的に利用された。科学者の中には、「陰イオンとマイナスイオンは関係がなく、イオンという科学用語を使用してあたかも科学的に立証されているかのように誤解を故意に与える疑似科学商品、霊感商法である」(大阪大学・菊池誠物理学教授)と断じる人がいて、これを「非科学」「科学的迷信」とする人も多い。

マイナスイオンという用語を広めたマスコミの責任は非常に重い、なぜか、国内の一流家電メーカーまでもがこのブームに便乗して「マイナスイオン効果」を謳う商品を開発し販売したということが今となっては驚きである。

科学リテラシーの低い一部マスコミは仕方ないとしても、一流企業の人たち、特に機器を企画、開発した技術者達は、「マイナスイオン」が未定義の用語であることや、効用を裏付けるデータがそろっていないということに本当に気付かなかっただろうか。あるいは、それを知っていて販売ブームに乗ったのか、真相ははっきりとはしないが、この事件は、科学的に実証されていない商品の宣伝に、勝手な造語が利用された典型例として記録され、大きな教訓を残した。

常識を覆す「新しい科学」には、理解が難しく怪しい科学と思われる時期があるので、常識が違うからといって、全てを疑っては新しいものは得られない。しかし、「正しい科学に基づくが技術的に実現が難しそうなもの」なのか、あるいは「科学のふりをしている偽物」なのか、個別に内容をみて見抜く必要がある。前述の菊池誠教授は、「ニセ科学とつきあうために」という寄稿に「テレビやインターネットであやしい情報が伝えられます。難しいところですが、ひとつひとつ考えてみる習慣をつけていただくしかないようです。」と述べている。宣伝や権威に惑わされることなく、自分で考える習慣が必要である。

「沸点差」には、商品の販売意図や詐欺のような悪意は感じられないが、

何となくありそうな用語という意味では「マイナスイオン」にどこか似ている。

どこの業界にも、業界やその会社だけにしか通じない言葉があるが、安易な造語や科学的根拠のない用語の使用は避けるべきである。基本的には、事典に載っていない用語を発明し使う時には、よほどの覚悟、それが将来正しい用語として認知されるという確信が必要である。言葉を作るのは、かなり重大なことであると認識すべきである。

0.7 「普通」ではない、ガスの液化

多くの人が、ガスを冷却すると液化できることを当たり前のよう考えているが、100年ほど前まで、これは非常識なことであった。

空気を冷やすとそこに含まれる水蒸気は液化して水になるが、空気そのものは、液化しない「永久気体」と思われていたからである。

19世紀初頭にトマス・ヤング(英国)がエネルギーという概念を導入し、気体を取り扱う熱力学の分野において様々な課題が明らかになってきたが、物質の根源は、よく分かっておらず、分子や原子の存在も仮想のものであった。物質とエネルギーは、その後、非常によく研究され、その実体が次第に明らかになってきたが、現在でもこれらを概念として正しく理解することは容易ではない。

20世紀初頭に量子論と相対論が現れて、多くの科学の課題が解決され、約半世紀かけて、新しい現代物理学が構築されていった。その中で、分子や原子が発見され、現在では当たり前と思えるような多くのことが発見され、理解され、ガスの液化も実現された。

現代物理の二つの柱のひとつ、量子力学は、その始まりは1900年であり、110年の時を経て、特別なものではなくなった。量子論は力学だけでなく、量子化学、物性物理、電子工学、生物学などあらゆる科学分野に利用され、自然科学だけでなく社会科学へも応用されている。

もうひとつの現代物理学の柱であるアインシュタイン相対性理論も世界を大きく変えた。特殊相対性理論によって時間と空間は絶対的なものではなく科学の対象となった。20世紀初頭に、時空の本質が理解されてから、科学の基本が変わったのである。光や電子、電磁場など身近な科学の理解には量子論だけでなく相対論も必要となった。

現代物理学のきっかけとなった、プランクの量子仮説が1900年、アイン

シュタインの特殊相対性理論が 1905 年、アインシュタインの一般相対性理論が 1915 年であるが、現在の深冷空気分離装置の原型であるダブルラム・プロセスが、カール・フォン・リンデ（ドイツ、1842-1934 年）によって発明されたのは二つの相対性理論の真ん中 1910 年のことである。

ガスの液化や空気分離技術の始まりが、量子論、相対論と同じ時期に重なるのは、単なる偶然ではない。現代物理学の進展と産業ガス技術の発展は、相互に密接な関係があった。現代物理学がなければ、分子や原子のふるまいや構造が理解できず、気体の液化や分離は実現できなかった。一方で、空気の液化技術やアルゴンやヘリウムの発見などがなければ、現代物理学における研究も進まなかった。

カール・フォン・リンデの名前は、産業ガスの業界では知らない人はいないというくらい有名であるが、一般には、あまり知られていない。しかし、大学でカール・フォン・リンデを教えたのは、熱力学の第一法則、第二法則を発見し、エントロピーという非常に重要な概念を提唱したルドルフ・クラウジウスであり、内燃機関ディーゼルエンジンを発明したルドルフ・ディーゼルはリンデ社の技術者である。カール・フォン・リンデの名前は知らなくてもクラウジウスとディーゼルの名前は多くの人知っている。リンデ社の開発責任者であったディーゼルが発明した新しい内燃機関は、マン社やスルザー社をはじめとする欧州の企業が実用化、その後、欧州だけでなく日本や米国などの多くの会社がディーゼルエンジンを製造し、世界中で使用されている。リンデ社も 2006 年までは、フォークリフトのトップメーカー、リンデ・フォークリフトを所有、リンデの名前は、運輸機器の分野でも非常によく知られている。カール・フォン・リンデの名前は、産業ガス以外の分野ではあまり知られていないかも知れないが、リンデ社のディーゼルが発明したエンジンやリンデ社のフォークリフトは、他の産業分野で広く知られている。

中学や高校の理科では、温度や圧力によって気体の体積が変わることを「理想気体」の性質として教えている。理想気体という概念によって、ボイルの法則、ドルトンの法則、シャルルの法則などが説明される。理想気体は、偉大な先人たちの研究の成果であり、とても理解しやすい法則である。17 世紀は、まだ物理と化学は分化しておらず自然哲学から物理が独立するのは 19 世紀になってからであるが、この時の科学は、見えない「気体の分子」を非常にうまく説明している。本来、ばらばらに存在するはず

の分子を容器の中に閉じ込めれば、気体の圧力が生じる。外から強い圧力をかければ気体の容積は縮む。温度を上げると気体は膨張する。ここまで、「理想気体」は、気体の性質をうまく説明したが、同じ物質が気体になったり液体になったりすることは説明ができなかった。理想気体は、いくら圧力をかけても高圧力の気体のままであり液化しないのである。

物質が液体として狭い空間にとどまるためには、強い分子間力（引力）が必要であるが、分子間力という概念がない理想気体は、文字通り理想的な気体であって、液体にはならないからである。

しかし、われわれが取り扱う空気や窒素は、理想気体ではなく「实在気体」であり、分子間力が優性になると液体になる。理想気体にはジュール＝トムソン効果がないが、实在気体は、ジュール＝トムソン膨張で温度が変わり、様々に工夫された液化プロセスによってガスの液化ができる。さらに古典力学的には、分子間力が全くない純粋な希ガスであっても量子力学的な理由によって分子間力（ロンドン力あるいは分散力と呼ぶ）が出現し、液化が起こるので、純粋なアルゴンやヘリウムであっても液化することができる。

ガスの温度が非常に高くなり、分子運動が大きくなると、相対的に分子間力を無視することができるようになる。このような場合、ガスは「理想気体」のように振る舞うので、分野によっては、ガスを理想気体として取り扱うことができる。しかし産業ガスの分野では、気体が液体になる領域を取り扱うため、分子間力は無視できず、实在気体としての取扱いが必要となる。空気や窒素や酸素の液化は、毎日行われる当たり前の操作であるが、理想気体の科学からみると、これはかなり常識外れのことである。したがって、理想気体は、ガスの科学の出発点であるが、ボイルの法則やシャルルの法則に留まっていたのでは、ガス屋は仕事にならない。20世紀の科学がなければ、産業ガスのビジネスは理解できないのである。

0. 8 産業ガスの新人教育と高圧ガス保安法

産業ガスの会社に入社する人のなかには、大学や研究機関でガスや様々な化学物質を取り扱った経験がある人も多い。しかし、入社前からこの業界に詳しいという人は少ない。社内の集合研修から得られる情報と実務を通じて、はじめて産業ガスというものを知る機会を得たという人がほとんどである。ガスを消費することはあってもガスを製造する立場にたったことがないのが普通であり、実務経験や知識がないのが当たり前である。

産業ガス企業の新入社員教育は、各人に産業ガスの基礎知識を伝えることから始まる。

最も重要なのは、安全教育であり、続いて、ガスの分離や分析、取扱い方法に関する技術の基礎、法令の基礎、さらに業界の商取引、商品に関する知識が必要となる。集合研修によって、それまで曖昧だった知識が整理され、時には、初めて知る事実もあり、安全に対する心構えができ、初めて実務につくことができる。

大半の知識がその後の仕事に役立つ重要なものであるが、時々、あまり役に立たない知識や一般に通用しない常識が混じることもある。教える側は、業界のベテランなので、実務を非常によく知っているが、しばしば、社会一般から離れた「業界用語」で話し、時には、その会社の中だけしか通じない話をすることがある。しかも、たいていは、そのことに気付いておらず、ベテランになるほどその傾向は強い。新人の頃は、業界特有の言葉を覚えると少し勉強した気になり、業界特有の閉鎖的な言葉を真似てしまうが、これは、他を排除し、異業種やアカデミーとの間に壁を作ってしまふことが少なくない。このレポートでは、できる限り非公式な用語や造語を指摘し、壁を取り外したいと思う。40年近くこの業界にいたのでかなり難しいが、そういうつもりで努力したい。

高圧ガス保安法における高圧ガス製造責任者免状の取得は、産業ガスの技術系社員の必須条件である。

免状がないと何かと不便であるというのもあるが、ガスの知識を習得しているという信用が得られないので、Gas Professionals のメンバーとはみなされないのである。免状を持つということは十分条件ではないが、必要条件である。

もし、入社前に熱力学や物理、化学の基礎が少々抜け落ちていたとしても、受験の項目の中には、ガスの圧縮や冷凍、物性、保安に関する学術試

験があるので、受験の機会に熱力学の初歩や基本的な熱サイクルなどを復習、勉強し直すことができる。

新人研修の時にどさっと渡される技術資料は非常に多く、全てを覚えることはできない。酸素や窒素の原子番号、分子量、密度や沸点などは、使っているうちに覚えてしまうが、その他のガスの必要な技術情報は、配布される手帳の巻末にたいていのことが掲載されているので、読み方さえ知っていれば十分である。

今は、インターネットという便利な道具もあり、必要な知識や情報は自在にユビキタスに入手できる時代である。Gas Professionals の技術者を目指すには、まずは、高圧ガスの免状取得によってガスの基礎を勉強し直し、仕組みを理解することが重要である。

0.9 テキストの構成

このテキストは、産業ガス事業の Gas Professionals の技術者のために、ガスの科学を整理するものである。各章を取り出して、途中から読んでも分かるように書いたため、項目が重複するところもある。また、ガス屋の常識的なことを書いている部分も多い。そこで、はじめにテキストの構成と概要をまとめておくので、不要なところは読み飛ばし、興味があるところだけ流し読みして頂けると幸いである。

第1章 産業ガスと空気分離

燃料ガスと産業ガス、産業ガスの基本であるセパレートガスと産業ガスと高圧ガスについて記す。純ガス、空気分離、原料空気、蒸留分離と気液平衡についてまとめる。

1.2 産業ガスと純ガス：

一般的な化学産業は、混合物や化合物を組み合わせる付加価値を生む産業であるが、産業ガスは、純物質に近いものを大量に生産する。これは全ての産業の中でも非常に珍しいビジネスである。

1.3 空気分離：

産業ガスの基本は空気を分離して製造されるセパレートガスである。最も古い工業的酸素の製造は、空気を原料として化学反応で酸素を取り出すブリンププロセスであったが、すぐに空気を蒸留分離する深冷空気分離技術が発明され現在に至っている。

1.3.2 原料空気：

空気は、地球の大気の一部である。対流圏とも呼ばれ、上が重く下が軽いため非常によく混ざっており、組成にムラがない。地球の重力と空気の密度では、質量による分離が起こらず、海面付近でアルゴンや酸素が濃くなったり、山頂で酸素が薄くなったりはしない。非常に均一な空気は、国によって偏在する資源とは異なり、万人に平等に与えられた地球資源である。

第2章 ガスの物理

2.1 気体の液化、分子の発見

2.1.1 理想気体の研究：

ガスの科学の基本である理想気体の研究について記す。最初の気

体の法則「ボイルの法則」は、中世までの錬金術が 17 世紀に化学や科学に変わるきっかけとなった。ロバート・ボイル、ロバート・フックとその科学についてまとめる。18 世紀には、シャルルとグレイニリュサックが気球を打ち上げて空気の研究を行った。ジョン・ドルトンとアメデオ・アヴォガドロが原子説をとらえた。

2.1.2 気体の液化：

理想気体は液化しないが、実在する気体は液化する。マイケル・ファラデー、ジュールとウィリアム・トムソンについて記す。

2.1.3 実在気体の研究：

ファン・デル・ワールスが最初の実在流体の状態方程式を導いた。

2.1.4 分子の発見、アインシュタイン：

産業ガスは酸素分子や窒素分子を売っている。しかし分子が、実際に存在することが確認されたのは、わずか 110 年前、アインシュタインの論文による。

2.2 階層（物質の階層構造）

数学にはゼロと無限大があるが、現実の世界にはそれがない。物質（エネルギーと空間）は有限の階層の中にあり、全ては下の階層（小さな階層）の法則によって支配されている。ガス分子は 10^{-10}m の階層にあり、われわれ人間の階層 10^0m とは全く異なる。階層が異なると、法則が異なって見え、常識が通じなくなる。階層を俯瞰する。

2.2.1 階層と尺度：

2.2.1.1 長さで表わされる階層

2.2.1.2 温度の尺度と温度の単位ケルビン

2.2.1.3 ガスの圧力と産業ガス

長さ、温度、圧力についてまとめる。

ガスの科学と非常に密接な関係にある温度の概念は、比較的近年になって確立されたものである。熱力学温度、その他の温度の尺度、温度目盛などについて記す。非常に複雑な圧力の単位とその変遷。

2.2.1.4 階層の観測：

階層を観測する方法として、音の情報、光の情報、光と電気（電磁波、放射線）の情報を観測する方法をまとめる。

2.2.1.5 大気と空気の階層：

空気は大気の一部であるが、地上の生物と文明にとって欠く

このできない重要な環境である。

2.2.1.6 見えない気体を記述する：

実在気体を記述するファン・デル・ワールスの状態方程式について記したが、より具体的な取り扱いを説明する。

2.2.2 中くらいの階層（メソスコピック） 10^9m ：

階層を大きく二つに分ける境界、ナノメートルの科学やナノテクノロジーについて簡単に記す。

2.2.3 大きな階層（マクロスコピック）：

酸素や窒素のような元素は地球で作られることはなく、その起源は宇宙にある。宇宙の観測から赤外線や紫外線は天体観測から発見され、分光法などの測定、分析技術も生まれた。ヘリウムも最初は太陽大気から発見された。

産業ガスには、天体観測、宇宙開発、高エネルギー物理学の顧客も多い。空気分離は地球上だけの話であるが、産業ガスビジネスはもっと大きな階層まで広がっている。宇宙 10^{27}m から人の生存圏 10^4m までを簡単にまとめる。

2.2.4 小さな階層（ミクロスコピック）：

ミクロスコピック（微視的）な領域にも大はオングストロームから小はフェムトメートル以下まで、非常に大きな幅がある。小さな階層の観測方

2.2.5 時間の階層（タイム・スケール）：

20世紀以降の科学は、空間と時間を同じ時空の科学としている。法についてまとめる。

2.3 量子力学：

2.3.1 現代物理学と量子論：

産業ガスは、19世紀末から20世紀初頭に始まる。製鉄や製塩のように古くからある産業に比べると、非常に遅れてやってきた新産業である。産業ガスの基本となる技術は、20世紀の幕開けと同時に始まる「現代物理学」「量子論と相対論の二大理論」なしには理解することができない。今となっては非常に古い学問となった量子論であるが、この大きなパラダイムシフトの理解は簡単ではない。ガス屋として今一度勉強しなおすためのきっかけをまとめる。

2.3.2 量子論の歴史：20世紀初頭の量子論の簡単な歴史

2.3.3 前期量子論

マックス・プランクが示した量子の概念、アインシュタインが示

した波動性と粒子性を持つ光量子、電子を波として記述するシュレーディンガー方程式、ハイゼンベルクの不確定性原理によって前期量子力学が確立した。

2.4 相対性理論：

量子論は多くの天才・秀才によって確立されていったが、相対論は、ほぼアインシュタインひとりの論文によって構築された。特殊相対性理論は、ニュートンの絶対時間、絶対空間の概念を捨てさり、ホイヘンスのエーテルを不要なものとし、光速度不変の原理によって物理学を再構築した。一般相対性理論では、ニュートンの万有引力の法則を書き換えた。

2.4.1 ガリレイの相対性理論：

われわれが通常取り扱う現象の多くは、古典物理学で記述することが可能であり、ガリレイ変換によって記述される。蒸留塔や熱交換器の中で起こる伝熱や物質移動の記述はガリレイ変換によって、どこでも同じ法則を用いることができる。しかし、観測者と対象物の現象の関係に注意が必要である。蒸留操作における拡散を例に現象の記述の注意点を述べる。

2.4.2 エーテル仮説：

20世紀初頭に行われた有名なマイケルソン＝モーレー実験によってエーテルが存在しないことが確かめられた。

2.4.3 アインシュタインの特殊相対性理論：

ガウスなどの古典的な電磁気学はマクスウェルによって統合され電磁気学が確立された。しかしこれを実際に使えるようにするためには、光速度の取り扱いという難題が生じた。

これを解決し、新たな電気力学を構成するために書いたアインシュタインの論文は後に特殊相対性理論と呼ばれるようになり20世紀を変えた。エネルギーと質量は統合され、時間と空間も統合された。ガリレイ変換はローレンツ変換という新たな形式をとるようになった。化学や化学工学の分野では、ほとんどローレンツ変換を必要としないが、産業ガスが取り扱う電子材料や電子機器、物性物理の分野では、相対論的な取り扱いが重要になった。

2.4.4 熱力学的時間の矢：

量子論はミクロの世界の見方を変え、相対論は時間と空間は絶対的なものではなく科学の対象にした。

しかし、ミクロの世界では時間の進む方向が決まっていなかったが、マクロの世界では時間は過去から未来へ一方向に流れているようにしか見えない。一度混合された空気は、そのままでは、酸素と窒素には分離されない。ガスを分離するには、低エントロピー資源（エネルギー源）を与える必要がある。時間の方向が決まっているように見える「熱力学の時間の矢」は、熱力学の第二法則として表現されており、その法則は破れていない。

2.5 量子論の確立

2.5.1 ディラック方程式と反粒子

前期量子力学は、相対論を含まない古典的な量子論である。ディラックは量子力学と相対論を統合し、場の量子論を作り上げた。

2.5.1.1 場の量子論、反粒子と真空の科学：

分子がないことを真空と考えた古典的な真空は過去のものとなり、エネルギーを含めた真空（空間）の科学となった。その結果、反粒子（われわれが知っている物質とは対称の粒子）が発見された。新たに発見された陽電子は、電子との対消滅反応が研究され、PET 診断などにも利用されるようになった。

2.5.1.2 真空工学(低圧力の技術)

古典的な真空は、地上に低圧力を作り出す技術、真空工学によって産業利用されている。宇宙空間並みの真空を作り出すことはできないが、分子が非常に少ない状態を利用した断熱技術が様々な分野で利用されている。

2.5.2 量子電磁力学(QED)：

ディラックが提唱した場の量子力学は、破綻しかけた。これを救った朝永振一郎やファインマンらによって量子電磁力学が確立された。

2.5.3 量子色力学(QCD)：

ゲルマンや南部陽一郎らによって、強い相互作用を扱う量子色力学が提唱された。

2.5.4 量子化学：

古典的な物理学が示す分子間力では、アルゴンやヘリウムのような希ガスの液化を説明することはできない。量子力学による化学の説明が必要となった。シュレーディンガー方程式以降、化学は量子論なしには語れなくなり、計算化学の発達によって大きく進化して

いる。

2.6 アインシュタインの一般相対性理論：

アインシュタインは、重力を含まない条件で特殊相対性理論を提唱したが、すぐにこれを一般化、進化させる研究に着手、新たな重力理論を導いた。

17 世紀の万有引力の法則は、引力を記述したが、その理由を示していなかった。アインシュタインは、エネルギー（質量）の存在が、時空を歪ませることを示し、重力を説明した。その後、様々な観測、実証実験、アインシュタイン方程式の解法が行われ、宇宙や物質の研究が本格的に行われる時代が始まったが、未解決の課題は 21 世紀にも持ち越されている。

2.6.1 一般相対性理論の利用例：

20 世紀に実用化された GPS では、特殊相対性理論と一般相対性理論による宇宙時間（衛星時間）の計算が行われ、補正が行われている。相対論を無視する測地システムは、全く使い物にならないほど大きな誤差を生じる。

2.6.2 時間の階層（タイム・スケール）

2.6.3 宇宙 138 億年の歴史：

20 世紀後半からの宇宙論は、宗教や物語ではなく、科学的宇宙論となった。宇宙の精密な測定によって、その組成、歴史、性質などが詳細に求められるようになった。現在では科学の定説となったビッグバン宇宙論、今も研究が進むインフレーション宇宙論。

2.6.4 太陽系 46 億年の歴史：

太陽系は宇宙の歴史の中では新しい恒星系である。かつて誕生と消滅を繰り返した星の残骸が原料となって太陽が作られ、様々な元素が受け継がれた。

2.6.5 地球 46 億年の歴史と空気の起源：

2.6.5.1 ジャイアントインパクト

近年の科学の発達によって地球創世記のシナリオが明らかになってきた。

2.6.5.2 大気の歴史・空気の歴史：

大気や空気がどのように変遷してきたのか、なぜ地球の大気には大量の酸素が含まれ、二酸化炭素が極端に少ないのか、なぜか、大量のアルゴンが含まれるのにあまり教科書には載ってい

ない。地球の空気がたどった歴史を考える。

2.7 素粒子と複合粒子：

半世紀ほど前までは、中性子や陽子、数多くの中間子など非常に多くの素粒子があった。現在では、最も基本的な粒子である素粒子が 17 種類にまとめられ、それらを組み合わせた複合粒子が、中間子、原子核、原子、分子などであると理解されるようになった。

2.7.2 量子の統計性：

素粒子とそれから作られる複合粒子などの量子は、その自由度（量子数）から 2 種類の統計性の異なるグループに分けられる。フェルミオンは物質そのものを構成する粒子、ボソンは相互作用を伝える粒子と考えられるようになった。ヘリウム超低温冷凍機（希釈冷凍機）は、ヘリウムの二つの同位体の異なる統計性を利用している。

2.7.3 複合粒子・ハドロン：

強い相互作用（量子色力学）の研究から明らかになったハドロン。大型ハドロン衝突型加速器などが建設され、核子（中性子、陽子）、中間子やこれを利用した研究が行われている。

2.7.4 複合粒子・原子核：

2.7.5 同位体：

同じ元素でありながら、質量数の異なる原子は同位体として区別される。産業ガスの商材である安定同位体に関する情報を整理する。安定同位体(SI)、天然存在比、放射性同位体、安定同位体の濃縮、半減期などについてまとめる。

2.7.6 複合粒子・原子：

かつては物質の根源とされていた元素、その元素を構成する粒子・原子は、基本物質ではなく原子核と軌道電子からなることが分かった。100 年ほど前に現在の原子模型が完成した。

第3章 アルゴンとヘリウム

第2章では、ガスの物理、物理の階層を中心に、ガスの科学と現代物理学全般を俯瞰した。ここでは、19 世紀末から 20 世紀初頭にかけて発見された希ガスについて説明する。

3.1 アルゴンの発見：

レイリーとラムゼーがアルゴンを発見した経緯についてまとめる。

二人には、同時にノーベル物理学賞とノーベル化学賞が授与された。

19世紀末、空気には酸素と窒素以外には二酸化炭素などのわずかな不純物しかないと思われていた時代である。空気には、なんと1%に近い大量の未知の元素が含まれていることが発見された。

3.2 アルゴンの起源：

空気中に大量に存在するアルゴンの起源は、地球上に大量に存在する放射性物質⁴⁰Kである。

3.4 ヘリウムの発見：

太陽で発見されたヘリウムは、地球上では見つからなかった。ラムゼーはヘリウムをウランの中から発見した。

3.5 原子核の崩壊とアルゴンの生成・ヘリウムの生成：

アルゴンとヘリウムは、放射性物質の崩壊によって大量に生成され続けている。地球上の希ガスを考えるとき、放射性崩壊の知見が必要である。その概要をまとめる。

ベータ崩壊(β^- 崩壊)とニュートリノ、ベータ崩壊(β^+ 崩壊)とPET診断への応用、ベータ崩壊(EC変換)とアルゴンの生成、 α 崩壊とヘリウムの生成についてまとめる。

3.6 ヘリウムの資源：

ヘリウムは天然ガス中に含まれ、分離・精製されている。ヘリウムは α 崩壊によって生成されており、当然のことながら化石資源ではない。石油と天然ガスは化石資源説(有機起源説)と深層地球ガス説(無機起源説)のいずれが正しいのか、その両方なのか未解明であるが、何故か一部の天然ガスにはヘリウムが含まれている。これまでに分かっているヘリウムの資源についてまとめる。

3.7 ヘリウムの製造：

天然ガスからのヘリウム回収プロセスについて示す。液化しない永久ガスは存在しないが、窒素中のヘリウムも非凝縮性ガスとみなすことはできない。ヘリウムと窒素の間の気液平衡を利用して、ヘリウムは蒸留分離されている

3.8 ヘリウムの貯蔵・輸送：

超低温で液化、貯蔵、輸送されるヘリウム関連技術を紹介する。

3.9 ヘリウムの特異な性質と超低温

3.10 その他の希ガス：

空気からその他の希ガスが発見された経緯についてまとめる。ハン

ブソンがラムゼーに提供した液体空気や液体アルゴンからいくつかの新元素が発見された。空気の液化技術は、希ガスの研究に大きな役割を果たした、

ラドンの発見、空気からの希ガスの製造、キセノンを用いた研究などを紹介する。

第4章 深冷空気分離

ここまでは、たいいていのことが教科書や書籍に載っている事柄ばかりであるが、本章は、主に産業ガス業界の内側からみたガスの科学について述べる。

4.1 空気分離装置：

空気分離器と空気分離装置、イナートガスとガスパージ、空気分離関連の紛らわしい用語について説明する。

4.2 深冷空気分離の簡単な歴史：

気体の研究と酸素の発見、空気分離装置の開発者のひとりカール・フォン・リンデについて述べる。

4.3 ガスの冷却：

2章ではガスの液化について簡単に触れたが、ここではもう少し具体的に空気を冷却するプロセス、液化サイクルについて説明する。

4.4 深冷空気分離装置の基本形：

化学産業などで一般的な蒸留装置は、液体原料を用いる。100年以上前に実験室で液体空気が作られ、これが蒸留分離されたという歴史もあって、工業的な空気分離プロセスも液体空気を原料していると勘違いされることがある。空気分離の原料は気体空気であり、製品も基本的には気体である。基本形について整理する。

4.5 棚段蒸留塔：カスケード分離と棚段蒸留、気液平衡計算（棚段塔の蒸留計算）について説明する。蒸留塔の計算方法を説明する。

4.5.4 窒素製造プロセス：

簡単な窒素の製造方法で空気分離の基本を示す。

4.5.5 ダブルカラム・プロセス：

酸素と窒素を同時に生産するダブルカラム・プロセスが100年ほど前に開発された。その基本形は現在も変わっていない。

4.5.6 ダブルカラム・プロセスと原料空気の圧力：

空気分離のエネルギー消費を決める最も重要な要素は原料空気の圧力である。ダブルカラム・プロセスと原料空気の関係を説明す

る。

4.5.7 アルゴンの濃縮：

ダブルカラム・プロセスにサイドカラムを追加してアルゴンを製造するプロセスについて説明する。

4.5.8 空気分離装置におけるヘリウム：

科学的には、非凝縮性ガスというものは存在しないが、非常に液化しにくいヘリウムは、工学的には注意を要するガスである。原料空気に含まれる微量のヘリウムの挙動について示す。

4.6 充填蒸留塔：

1990 年頃より深冷空気分離装置の蒸留塔に復活した新世代の充填塔について解説する。

4.6.1 棚段蒸留塔の効率：

棚段塔における蒸留の効率をおさらいする。

4.6.2 充填塔：

はじめに蒸留塔以外の充填塔について復習しておく。不規則充填物を用いるものには、深冷空気分離装置の前処理に使用される吸着塔、パーライト充填で断熱されるコールドボックスなどがある。充填材と充填物など紛らわしいが全く意味の異なる用語についても整理しておく。

4.6.3 規則充填物を用いた充填蒸留塔：

棚段塔とは全く異なる充填蒸留塔における機構（気液接触、蒸留分離の仕組み、移動現象）について説明する。熱と物質の同時移動現象と蒸留の速度論モデル、その速度論を用いた蒸留計算、規則充填塔の空気分離装置への適用など、について解説する。

4.7 深冷分離による軽元素の同位体分離：

深冷空気分離装置の蒸留分離技術を応用した酸素同位体の蒸留分離について説明する。

第5章産業ガスの広がり：

ガス屋であれば、ほぼ知っている産業ガスの商材の概略をまとめた。非常に簡単に示したので、実務ではカタログ情報が重要。

第6章産業ガスと資源・エネルギー

産業ガスは、エネルギーを消費してガスを分離・精製する産業であるが、エネルギー産業や他のエネルギー多消費産業に対して、効率化や省エネの

ソリューションを提案できる産業でもある。21世紀の製造業は、エネルギーを考慮せずに持続することはできないが、これは製造業だけではなく文明そのものの持続可能性がエネルギーに大きく依存している。

6.1 化学原料：エネルギー資源と化学原料

6.2 エネルギー

6.2.1.1 エネルギーの概念：

トマス・ヤングが、エネルギーという概念を発明（1807年）してから210年たつ。実体がなく定義も分かりにくいエネルギーの科学的定義。

6.2.1.2 エンタルピー：

解析力学では、エネルギーをラグランジアンやハミルトニアンで表現した。熱力学では、取り扱いが難しいエネルギーをルジャンドル変換によってエンタルピーという便利な関数で表現した。

6.2.2 エネルギー資源の基準：エネルギーという言葉は、しばしばエネルギー資源と同義で使われている。エネルギー資源を評価するための基準が研究されている。

6.2.3 エネルギー資源と文明：エネルギー資源と人口、文明の発達是非常に密接に関わっている。

6.3 石炭：

石炭による第一次産業革命、石炭の物性、石炭資源、高度な日本の石炭利用技術

6.4 石油：

石油による第二次産業革命、石油資源の偏在、石油の経済的影響、石油のタンカー輸送についてまとめる。石油の起源は科学的に解明されておらず、その埋蔵量もよく分かっていない。

6.5 天然ガス：

シェール革命、天然ガスの性質、天然ガスインフラ、LNGの冷熱利用（空気分離への利用）、船舶の燃料転換、都市ガスと天然ガスなどをまとめる。

6.6 原子力エネルギー：

原子力の利用は、ほとんどが発電と医療である。原子力エネルギーの歴史、原子炉の基本、日本の原子力発電、世界の原子力発電などについてまとめる。

6.7 再生可能エネルギー：

21世紀になって再び注目されるようになった再生可能エネルギーとは、どのようなものをまとめる。6.7.1 再生可能エネルギーの定義、6.7.2 再生可能エネルギーの普及支援制度、具体的な再生可能エネルギー資源（水力発電、PV、風力・風力発電、地熱）、再生可能エネルギーと電力、電力料金、ドイツの再生可能エネルギー

6.8 エネルギー貯蔵：エネルギーの貯蔵技術をまとめる。電力貯蔵、電池技術、水素エネルギー、CAES/G-T（圧縮空気貯蔵）

6.9 省エネルギー：

省エネというのは日本語であり、対応する英語がない。エネルギー使用の合理化とエネルギー消費の低減を合わせた言葉である。

様々な省エネ技術を紹介する。コージェネレーション、省エネ家電、地中熱利用、熱電発電、排熱回収・バイナリー発電、スターリングエンジン、熱音響エンジンなど、この中にはガス屋の次のビジネスの種が含まれているかも知れない。

6.10 エネルギーのリスク：

エネルギーの利用には大きなリスクを伴う。文明には、ゼロリスクはあり得ず、100%の安全も安心も存在しない。リスクを低減するための知識・工夫・施策が必要である。

発電のリスク評価、石炭利用のリスク、大気汚染、石油流出事故、天然ガスの採掘事故、原子力の事故、再生可能エネルギーによる事故などについてまとめる。

第7章 ガスの物理まとめ：

科学と産業ガスの関係をまとめる。また科学の正しい用語と、産業ガスの日常用語の（未解決）課題についても触れる。

第8章 参考資料：

参考図書とその内容を非常に簡単にまとめた

第9章 付録：

ガス・物質の科学を築いた人々などに関する資料、簡単な物理数学の抜粋など