

日本の冷凍空調技術は主として第二次大戦後米国より導入され、経済の復興とともに、国民生活に密着した産業として発展してきました。現在、電気冷蔵庫のない家庭生活は考えられませんし、空調機により冷暖房されてない事務所なども探し出すことがむずかしい現状です。生鮮食品は産地と消費地を結ぶコールドチェーンによって、効率的に保管、輸送され、毎日食卓にのぼる食品のほとんどが冷凍技術の恩恵をうけています。

世界の冷凍・空調機器の生産は、まず、米国で発達し、これに欧州、日本が続き、今では新興国にも急速に広がりつつあり、まさに国際化の波のただなかにあります。冷凍空調技術に関する知識もこうした動きを反映したものでなければなりません。

1. 冷凍とは何か

“冷凍” **refrigeration** という言葉からは、ふつう冷凍食品とか、冷凍庫などを連想します。食品を長期間貯蔵するため、その凍結点以下の温度にして、こちこちに凍らせることと思われるかも知れません。しかし、“冷凍”に対応する英語 **refrigeration** は、凍らすことだけを意味するものではありません。漢字の意味から“冷”は冷却 **cooling, chilling** であり、“凍”は **freeze** です。すなわち“冷凍”とは冷やすこと及び凍らすことです。

▶ 冷凍とは物体または空間から熱を奪うことであり、熱のより少ない状態をつくりだすことです。全く熱のない状態は**絶対零度**であり、理論的に存在する温度レベルです。

▶ 熱とは、温度の差によって移動するエネルギーの一形態です。この熱の移動は、高い温度の物体または空間から、低い温度の物体または空間に向かってなされます。決してこの逆は起きません。これは水が高い所から低いほうへとしか流れないことと同じです。これを**熱力学の第二法則**といいます。この第二法則は、46 ページで改めて解説します。

▶ 物体を冷凍するには、その物体より、低い温度の物体を持ってくるか、作り出すかする必要があります。

古代人が、獲物の肉を冷たい洞穴や泉に貯蔵したり、中世に雪や氷によって冷たい飲物を作ったのは、前者の例です。古代のエジプトでは、素焼の壺にワインを入れ、屋根の上に置き、夜風によって蒸発冷却をしたとの記録が残されているそうです。

古代エジプト人は、液体の蒸発がものを冷やすということをすでに知っていました。これらの素焼の壺は、夜間に屋根の上に置いてワインやビール、その他の飲み物を冷やすため

にエジプト人が利用した典型的なものです。

彼らは冷凍技術の先駆者だったわけです。

古代エジプトで行われた液体を蒸発することにより冷凍を行う方法が、現在の冷凍・空調機器においても全く同じ原理で使用されています。

機械式冷凍機では、図 1.1 に示すように、密閉された容器内を**冷媒**と呼ばれる化学物質が状態変化をしながら、熱を吸収したり、放出したりして循環しています。

一般的には気体 **gas** (または蒸気 **vapor**) と液体 **liquid** を流体 **fluid** といいます。

冷媒は蒸発器に液体として供給されます。そこで熱を吸収して蒸気になります。圧縮機 **compressor** により加圧された蒸気は、再生部である凝縮器で冷却され、熱を放出して元の液体に戻ります。これはちょうど底に小さい穴の開いたボートが湖上に浮かんでいるのと同じです。水は絶えずボートの中に流れ込んできます。これをバケツで絶えずくみ取り、ボートの外に捨てます。ここが凝縮器です。このように冷凍サイクルは、熱を取る冷却部と熱を捨てる再生部から成り立っています。

実際の冷凍サイクルは、図 1.1 に示すように、冷媒を再生するために必要な圧力を与える圧縮機、及び熱を捨てた液冷媒を減圧し、低温にして蒸発器に流し込む働きをする膨張弁が組み込まれています。

KEY EXPRESSIONS

▶ 冷凍 **refrigeration**

- 1 to keep or make cold.
- 2 to freeze or chill (foodstuff, etc.) for preservative purposes.

▶ 絶対零度 **absolute zero**

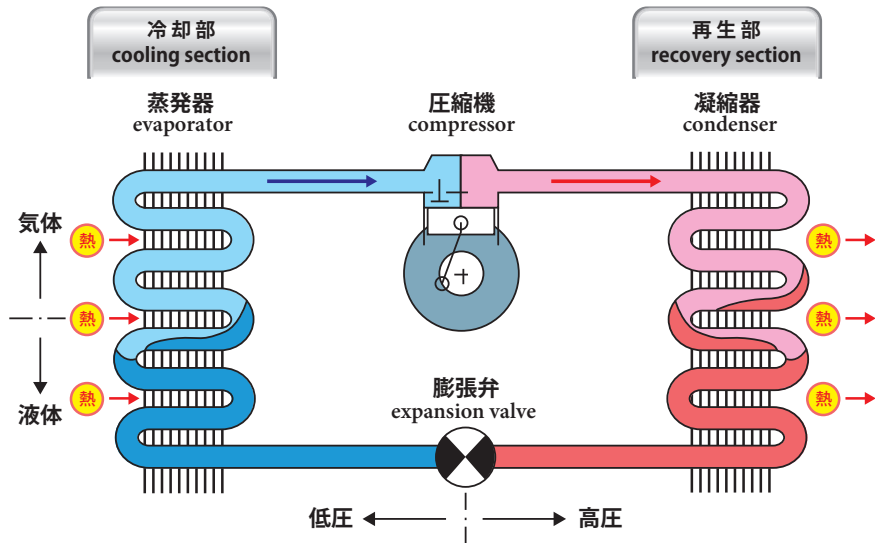
A point that can be theoretically attained when all intrinsic molecular activity completely ceases.
-273.15°C.

▶ 熱力学の第二法則 **The second law of thermodynamics**

state that the spontaneous transfer of heat from a cold to a hot body is impossible. It also expresses the concept that heat energy is not qualitatively equivalent to other forms of energy, but of lower quality.

▶ 冷媒 **refrigerant**

The fluid used for heat transfer in a refrigerating system. Which absorbs heat at a low temperature and a low pressure of the fluid, and rejects heat at a higher temperature and a higher pressure of the fluid. usually involving changes of state of the fluid.



【図1.1】 冷凍サイクルの概念

2. 冷凍と空調の歴史

米国で冷凍のための天然氷が商業的に売り出されたのは、1800年代になってからです。1805年、西インド諸島で黄熱病が流行し、初めて大量の天然氷がボストン港から出荷されました。このボストン氷は、後に1870年ごろ（明治初期）横浜向けに出荷されるようになりました。日本の商業用天然氷は、同じ頃函館でつくり始められました。ここでは3500トンの貯氷庫をもつようになり、ボストン氷と函館氷ははげしい商戦を演じたと記録されています。この商戦は結局、地の利を得た函館側の勝利となって、ボストン氷の日本への輸出はなくなりました。

● アンモニア冷凍機から始まる

1800年代の終わりごろ、アンモニア冷凍機が製造されるようになりました。当時は電動機がなく、蒸気エンジン駆動による冷凍機でした。1896年、初めて交流電動機がつけられ、電動式冷凍機の基礎ができました。

1916年から20年にかけて、家庭用電気冷蔵庫がつくられました。冷媒は亜硫酸ガス(SO₂)であり、ベルト掛けでした。1920年から35年にかけて、多くのメーカーがこの分野に参画し、数多くの技術的進歩がなされました。ロータリー圧縮機、全密閉形圧縮機なども開発されました。

同じ頃吸気式家庭用冷蔵庫がつくれ、電源をもたない地域に販売されるようになりました。

わが国の家庭用冷蔵庫も、同じ頃輸入され、これが参考となって国産化され、1933年には量産化されるようになりました。

1922年、米国にてターボ冷凍機1号機がつくられました。わが国の1号機は1930年であり、冷媒はメチレンクロライドでした。

● 産業としての発展

アンモニア冷凍機から始まった冷凍・空調機器の業界が、一世紀を経ずして国民生活に密着した基本産業の一つとして発展した背景として、次の技術開発があります。

《空調の理論》

1911年、空調の父と呼ばれているウィリス・キャリア Willis Carrier (1876 - 1950) が湿り空気線図 **psychrometric chart** を発表しました。空調設計の基礎が、この線図により確立されました。

《フレオンの発明》

1930年、デュポン DuPont 社によってフルオロカーボン冷媒 **fluorocarbon refrigerant** が発明され、1930年、Freon の名称で商業用冷媒として発売されるようになりました。

従来の冷媒は毒性が強かったり、可燃性があったりして、家庭、事務所、公共施設などでの使用がむずかしかったのですが、フレオンの発明により、安全性についての問題が解決されました。

その後、多くの種類のフレオンができ、フレオン系冷媒を形成するようになりました。なお、現在わが国ではフロン of 名称を使用していますが、これは日本だけの呼び方です。

《圧縮機の密閉化》

1935年、密閉形圧縮機がつくられました。**圧縮機の小型化・密閉化**は、冷蔵庫、ルームエアコンを家庭用に導入するため、絶対に必要な条件でした。

KEY EXPRESSIONS

▶ 圧縮機の小型化・密閉化

The advantages of hermetic concept induce reduced size and weight; less cost to the manufacturer; no seal failure problems; less noise; no belt maintenance; location not critical……

《空冷化とヒートポンプ》

空冷化によって、運転圧力は上昇しましたが、一方で分離形にすることにより、自由な場所に設置できるようになりました。そして、空調機を分割するスプリット・システム **split system** が採用されるようになり、室内と室外にユニットが分離して設置されるようになりました。

また、四方切換弁 **reversing valve** を用いて冷媒サイクルを逆転することにより、容易に冷房と暖房の切り替えをすることができるようになりました。

《インバータ》

1982年家庭用エアコンに初めてインバータを搭載した製品が発売されました。従来の一定速で回転する圧縮機ではなく、負荷に応じて能力を可変できるインバータの搭載はエアコンにとって省エネ・快適性の観点から画期的な出来事でした。部分負荷運転時における省エネ性により通年エネルギー消費効率 **APF** を大きく向上することが可能になりました。日本初のこの技術は今や世界中に広まりつつあります。

以上の基本的技術進歩によって、家庭用冷蔵庫やルームエアコン・パッケージエアコンは各家庭、事務所における必需品となっていきます。

3. 産業への貢献

火を使いこなした人類、その火から発生する熱によって動力を得ることによって、産業革命がおきたのと同じように、天然水により得た冷却作用は、冷凍機の発明によって、科学と産業の進歩に大きな貢献をするようになっていきます。

冷凍技術の産業応用の例として、合成ゴム開発のエピソードがあります。第二次世界大戦で天然ゴム入手が困難になった米国では、政府と業界が合同して合成ゴム **synthetic rubber** 開発プロジェクトをつくりました。そして低温利用によって、天然ゴムよりはるかに強い耐久力をもった合成ゴムの製造に成功したといわれています。ここで開発された高分子化学の低温利用は、続いてプラスチック、合成繊維など、石油化学工業の基礎となる多くの新製品をつくり出しました。また、戦後最大の進歩を遂げた半導体産業 **semiconductor industry** は空調技術 **process refrigeration** のヘビー・ユーザーとなりました。

冷空空調技術なしに、これら近代産業の発展は考えられませんでした。

わが国の熱エネルギーを分担している電気・ガスは、輸入される液化天然ガス **LNG liquefied natural gas** に依存しています。液化天然ガスは、産地において -168°C にて液化され、この低温を保持しながら、わが国の港まで運ばれてきます。そして海水その他の排熱で加熱して、元のガス体に戻しています。

低温利用技術は製薬の分野でも活用され、多くの新薬をつくりました。また血液銀行 **blood bank** を初めとする人体の組織や臓器の保存が、 -80°C 以下の急速凍結によって普及し始めました。

畜産業の分野においては、種牛の精液を -80°C 以下に保存し、随時人工受精することにより、育種の改良を成し遂げました。

空調におけるクリーンルーム技術は、近代化された病院では、随所に用いられ、院内感染などを防ぎ、分娩室、未熟児室、**ICU intensive care unit**などで、利用されています。わが国の保健衛生の発展の基礎をつくっている冷凍技術は、日本人の平均寿命を世界一のレベルに引き上げたといえるでしょう。

冷凍空調技術は、精密機械工業、特に輸送機械工業の発展に寄与しています。宇宙ロケットは、常温の地上から11分後には -60°C の低温にさらされ、その間過酷な振動と重力の変動を受けます。このため、事前にこれらの環境変化に耐えられるかを地上でテストしなければなりません。これが、温度、湿度、振動その他の環境因子を変化させて、製品の信頼性を高めることを目的とした環境試験装置です。

この装置によって、精密機械、特に輸送機械の信頼性は向上し、わが国の自動車産業を世界のトップレベルに押し上げる推進力となりました。温度の変化は金属の寸法に影響を与え、湿度の変化は吸湿性 **hygroscopic** の物体の寸法に影響を与えます。

工業用空調は、恒温恒湿を要求される場合が多く、これは、製品の高度化のために必要となった条件といえます。

4. これからの冷凍空調

● 省エネルギー化への挑戦

今、省エネルギーが世界の課題になっています。冷凍空調機器は、民生用、産業用、運輸用いずれにも用いられていますが、民生用に最も多く用いられています。

民生用の中でも、家庭部門、業務部門いずれも冷暖房、給湯のためのエネルギー消費の占める割合が大きく、この部門の効率向上が求められています。

冷凍空調における効率を示す指標として、以前は **EER (Energy Efficiency Ratio)** が用いられていました。EERとは、冷凍空調機器の発揮する能力(kcal/h, BTU/h)を消費電力(W)で除した実用的な単位として用いられたものです。例えば米国では能力BTU/hに対してBTU/W・hが、日本では能力Kcal/hに対してKcal/W・hで示されました。ただ、単位系の国際整合により、冷房能力の単位は、Wになり、単位記号の付かない無次元数となりました。これを **COP (Coefficient of Performance, “シーオーピー”**と読みます)と いい、多くの冷凍空調機器のエネルギー効率の指標として用いられています。

COPの向上は、熱交換器形状の変化、圧縮機構造の改善、回転数制御の導入などによって、急速に進められ、かつ、今なおこの産業の最大の課題といえます。またCOPは一定の運転条件における効率ですが、実際には外気温度等の条件が時々刻々変化する中での運転になるため、ある期間を通しての効率が必要になります。これを期間エネルギー消費効率SPF **Seasonal Performance Factor**と称し、この値で評価することが、年間のランニングコストを評価するのに最も良いといわれ、ています。日本ではルームエアコン・業務用エアコンについて、通年エネルギー消費効率APF **Annual Performance Factor**がJISで定められています。

空調や給湯用のヒートポンプは、主として外気から得た熱エネルギーを利用することによって、暖房、給湯を行っています。冷暖房兼用の空調機器はすでにほとんどがヒートポンプ化されましたが、給湯分野をヒートポンプでまかなうための挑戦が続けられています。また、ヒートポンプは産業用加熱、除湿、乾燥など、広い産業分野において実用されています。この温度範囲をさらに拡大できれば、産業用ヒートポンプの利用も大きく期待されます。

● 地球環境問題への対応

冷凍空調機器は、多くの資源を用いた素材により利用され、使用中は大きなエネルギーを消費し、また使用が終了したときには相当量の廃棄物として排出されます。これらは多面的な環境問題と直面します。その最大のものが、冷媒にフロン類を採用していることです。

フロンは難燃で毒性が小さく、理想的な冷媒として使用されてきたのですが、1974年、アメリカのローランド博士（1995年ノーベル化学賞受賞）が、フロンが大気中に放出されると、上空の成層圏にまで達し、オゾン層を破壊することになるとの学説を発表しました。

オゾン層の破壊により紫外線が増加すると、皮膚がん多発などの悪影響をもたらすばかりでなく、動植物の遺伝子を傷つけ、生存をさまたげるおそれがあるというものでした。また、1985年に南極でオゾンホールが発見され、実際にオゾン層が破壊されていることが決定的になり、世論はフロンの規制へと向かいました。

そして、フロン規制のための世界的枠組みとして「モントリオール議定書」（1987年）が採択され、国際的にオゾン層破壊物質の規制が始まりました。

それから25年余り、特定フロン等（CFC、HCFC等）の生産・輸出入は段階的に規制され、着実に代替物質への転換が進められていきました。

一方、特定フロン等の代替物質として、オゾン層を破壊しないフロン（代替フロン：HFC）が開発され、普及してきました。ところが、代替フロンには、地球温暖化をもたらすという、次なる問題があったのです。

1997年、地球温暖化を防止するための「気候変動枠組条約」に基づいて、具体的な温室効果ガスの排出抑制対策として、「京都議定書」が採択され、2005年に発効しました。

この中で「代替フロン等3ガス」(HFC, PFC, SF₆)は二酸化炭素の数倍以上という大きな温室効果をもっていることから、排出抑制に向けて最大限の努力が求められてきています。

フロンや代替冷媒等による生活の利便性という恩恵を受ける一方で、私たちは、その利便性をできる限り維持しながら、オゾン層破壊物質の生産等を削減しつつ、同時に、その代替で使われる代替フロン等も削減しなければならないという困難な課題に取り組み、その克服に向けた努力を重ねていく責任を負っているのです。