

人と熱との関わりの足跡（その5）

—我が国の空気調和の父 柳町政之助の偉業—

*Footprints of the relationship between humans and heat (Part 5)*

*-Great Achievements by Masanosuke Yanagimachi, Father of Air Conditioning System in Japan-*

高橋 惇（元高砂熱学工業株式会社）

*Atsushi TAKAHASHI (Formerly, Takasago Thermal Engineering Co., Ltd.)*

*e-mail: airport3@jcom.home.ne.jp*

1. はじめに

高砂暖房株式会社（現高砂熱学工業株式会社）と株式会社荏原製作所は、1930年5月に共同して国産第一号となる高砂荏原式電動遠心式冷凍機（以降、高砂荏原式ターボ冷凍機と略す）の試作機を完成させた[1, 2]。この高砂荏原式ターボ冷凍機は、百貨店・劇場・紡績工場等の空気調和設備に採用され、1931年から1941年までの納入実績は104台、合計18,500日本冷凍トン（以降JRTと略し、説明は文末に記する）と記録されている。

（図1）. なおこの高砂荏原式ターボ冷凍機は、2010年8月7日の機械の日に、一般社団法人日本機械学会から機械遺産 No.42 に認定された[3].

本報では、開発当初の技術資料類[1, 2]に基づき、高砂荏原式ターボ冷凍機の開発の経緯、開発試作機の技術内容、並びに、開発者であり高砂熱学工業株式会社（以下、高砂熱学）の初代社長であった柳町政之助（以下、柳町）の著書および講演内容から、空気調和設備分野における偉業について紹介する。



図1 現存する最古の高砂荏原式ターボ冷凍機  
（高砂熱学工業 技術研究所 所蔵）

現存する最古の高砂荏原式ターボ冷凍機 130JRT は、1937年に製造され六桜社（現 コニカミノルタ株式会社）の日野分工場に納入され、約30年間使用された後、1974年2月に撤去・保存されたもので、我が国の空気調和の発展に寄与した歴史的な機械類として、現在、神奈川県厚木市にある高砂熱学工業の技術研究所の玄関脇に展示・保管されている



図2 我が国の空気調和の父 柳町政之助

柳町（図2）は1892年（明治25年）に生まれ、1913年（大正2年）に当時の東京高等工業学校（現在の東京工業大学）機械科を卒業、卒業後は機械類を扱う大手商社を経て、大正9年（1920年）から高砂工業（当時）に勤務した[2].

2. 機械式製氷・冷凍の歴史

1748年にスコットランドの医師であり化学者であったカレン（William Cullen）は、グラスゴー大学でエチルエーテルを容器に入れて減圧し、低温沸騰させることで周囲から気化熱を奪う過程で冷却が起こり、少量の水ができることを公開実験で実証した[4]. これが機械式製氷の始まりとされている。

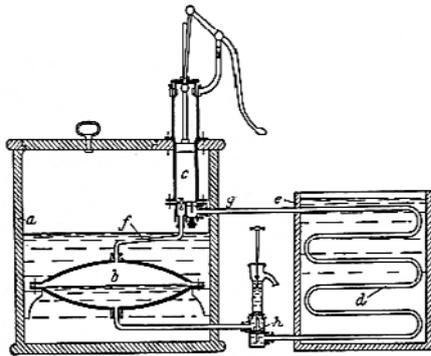


図3 Jacob Perkins の動力駆動冷凍機

1834年に米国の Jacob Perkins は、図3に示すエーテル等を冷媒とした動力駆動の冷凍機を設計し、特許を取得した。aは凍らせる水を入れた断熱された容器、bは冷媒の気化器を示す。気化した冷媒蒸気は導管fを介して弁機構を持つポンプcによって吸引され、cで加圧された後gを經由して冷却管dに圧送される。加圧操作で加熱された冷媒蒸気は水槽eで過冷却され、絞り機構hで断熱的に膨張することにより冷媒は液化する。液化した冷媒がb内で再び気化する際、aから蒸発熱を奪うことによりa内に氷が生成される。これが機械式の冷凍の始まりとされている。

その後に Perkins は英国に渡り、英国の特許を取得、製氷機を利用した事業を興したが、当時はまだ水を大量に生産・流通させる社会経済基盤が整っていなかったために、商業的には成功しなかった[5]。

実用的な製氷機は、1859年に仏国のカッレ (Ferdinand Carré) が開発したアンモニア吸収冷凍機が最初とされている[5, 6]。アンモニアを冷媒、水を

吸収液とした吸収冷凍機を図4に示す。

GENERATOR 内のアンモニア水は、容器の下面から加熱されてアンモニア蒸気になる。CONDENSER で過冷却されたアンモニア蒸気は、EXPANSION VALVE で断熱膨張して液化する。液化したアンモニアは冷蔵庫内の ICE TRAY の水から熱を奪ってアンモニア蒸気に、水は氷に相変化する。アンモニア蒸気は、ABSORBER 内に散布された水に吸収され、アンモニア水としてポンプで密閉容器に返送される。

吸収冷凍機の基礎となったこの Carré のアンモニア吸収冷凍機は、1860年には12~100kg/hの製氷能力を持つ連続作動する5種類の生産が開始され、製氷業やビール醸造業で多く採用された。

1876年にドイツのリンデ (Karl Paul Gottfried von Linde) は、圧縮式が最も優れているとして、アンモニアを冷媒とした2気筒型圧縮機を完成させた。翌1877年には、型圧縮機を改良した水平往復動型のアンモニア圧縮機を製造し、大きな成功を収めた[5]。

同時代には、CO<sub>2</sub>やSO<sub>2</sub>を冷媒とする冷凍機も製造され、19世紀末までに食肉冷凍分野の冷凍産業を支えた。

日本では1878年に、神戸と横浜の外人居留地内の製氷工場にはじめて水平往復動型アンモニア圧縮機が導入され、1882年には東京築地と大阪河口の製氷工場に設備された。

製氷・冷凍業が発展したのは大正期に入ってからであるが、当時の冷凍機は、米国のヨーク社、ビルター社、フリック社等の輸入機械であった。

1910年台には国産のアンモニア冷凍機が製造されたが、輸入品より性能・耐久性・外観等で見劣りするものであったようである。特に、アンモニア圧縮機の軸封が不完全で、時々アンモニアの漏洩による悪臭に悩まされていた。また、水平往復動型圧縮機では、回転数と往復動の容積で単位時間当たりの吐出量が決まるが、回転数を上げるには限界があるため、大容量の冷凍能力を実現するためには大型にならざるを得なかった。

1925年に森永製菓鶴見工場に設置されたアンモニア冷凍機の水平往復動型圧縮機を図5に示す。

アンモニア冷凍機の水平往復動型圧縮機は、モリエル線図からシリンダの直径、ピストンの全振幅長と回転数(アンモニアの循環量)が算定され、その

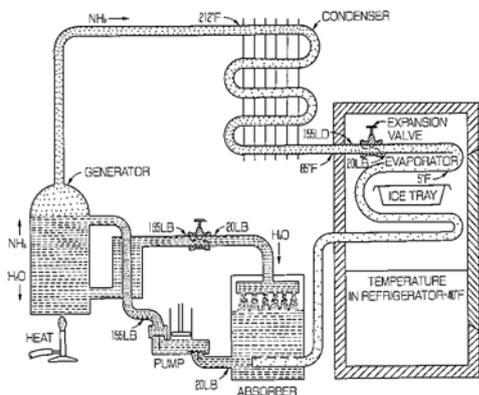


図4 F. Carré が開発したアンモニア吸収冷凍機

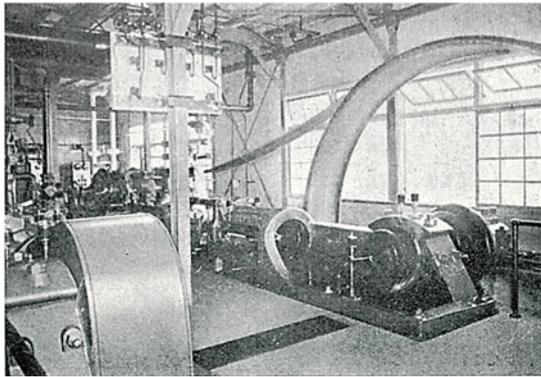


図5 森永製菓鶴見工場に設置された水平往復動型アンモニア冷凍機

上で凝縮器と蒸発器の伝熱面積等が設計された。その結果、電動機が 150kW、シリンダの直径が 350mm、ピストンの全振幅長 700mm、平ベルト掛けフライホイールの直径が 4,200mm という途轍もなく大きな設備となった[1]。これについて、当時技師長であった柳町は特に水平往復動型アンモニア冷凍機の容積・重量が大きいことおよび圧縮機の往復動で生ずる建物共振点に近い振動の発生により、「事務所建築の冷房用途には不適合である」と感じていた。これが次に述べる回転式のターボ冷凍機の開発のきっかけとなった。

一方、大正期にかけてアンモニアに代わる冷媒として CO<sub>2</sub> を用いた冷凍機が試作されたが、圧縮圧力が非常に高いため、当時の冷凍機用圧縮機類の技術では発展させることが出来なかった。最近では、高圧の冷凍機用圧縮技術の進展と地球温暖化防止の観点から、CO<sub>2</sub> は自然冷媒として復活しているのは周知の通りである。

### 3. 国産の遠心式冷凍機の開発

以下では、1955年に冷凍誌第30巻第332号（ターボ冷凍機特集号）に記載された柳町の回想記事[7]から、高砂荏原式ターボ冷凍機の開発の経緯を紹介する。その上で、株式会社荏原製作所の山岸社長と大岩順二氏の「ターボ冷凍機に就いて」[8]から、高砂荏原式ターボ冷凍機の開発機に関する技術内容について述べる。

#### 3.1 高砂荏原式ターボ冷凍機の開発

1915年頃から柳町は、米国の空気調和の父と呼ばれたキャリア（Willis. H. Carrier）博士（以下キ

ャリア）の報文類を収集し、温度・湿度の調整に係る新技術に感心を持ち、絶えず研究をしていた。1923年に Heating & Ventilation 誌に掲載されたキャリア考案による Centrifugal Refrigerating Machine の記事を読んで、「事務所建物のための冷凍機は遠心式だ」と直感し、キャリアの遠心式冷凍機を輸入しようと計画した。しかし、冷凍機本体の見積価格もさることながら、派遣技術者達の出張費が予想以上に高く、実現できなかった[1,2]。

そこで遠心式冷凍機の国産化を目指すことになった。冷媒はドイツからジクロロエチレン (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>) を輸入する目途が付いた。他方、回転機についてもパートナーを見つける必要があり、1929年頃に新興のポンプメーカーであった株式会社荏原製作所が米国のブロー社の多翼送風機に対抗したターボ形送風機の国内生産に着手していたことに着目して、ターボ形送風機の設計担当者であった同社の大岩順二氏を開発担当者として国産 6 段のターボ型圧縮機の共同開発に取り組んだ[1, 2]。

1929年、柳町はこの国産 6 段のターボ型圧縮機の開発を目的として先進の技術を視察すべく渡米した。ロサンゼルス の Biltmore Hotel に宿泊した際にもホテルの冷房設備に関心を持ち、ホテルの技師長の好意で、蒸気駆動のターボ冷凍機 (125JRT) の運転状況を視察することができた[2]。

帰国後、即座に荏原製作所と打合せを行い、75JRT の電動ターボ冷凍機の試作に取り掛かった。電動機 75kW で駆動された 75JRT の電動ターボ冷凍機の試作機 (COP=3.86) は、翌年 1931 年に完成し、大岩氏により「高砂荏原式ターボ冷凍機」と命

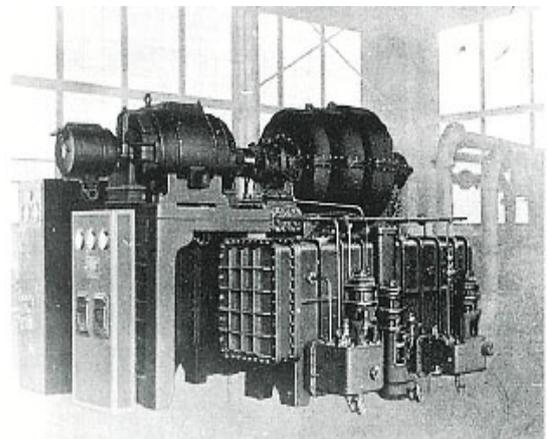


図6 国産第一号となる 150JRT の高砂荏原式ターボ冷凍機（ブライン冷却用途）

名された。図6に150JRTの国産第一号となる高砂荏原式ターボ冷凍機を示す[10]。

試作機の開発期間中の出来事として同記事[10]には、次のような記述がある。

試作を進める一方で、キャリアが設立したキャリア・エンジニアリング社(以降、キャリア社と略す)から、我が国を対象としてターボ冷凍機の主要部分における広範囲に亘る内容の特許公告が出されていることを知った。キャリア社の我が国に対する特許出願日は、柳町が帰国した日の1週間後であった。柳町は、帰国後早々に荏原製作所や共同開発関係者にターボ冷凍機に関する説明を既に行っていたことから、公告に示された広範囲の部分は我が国では既に公知の事実であるとして、キャリア社の特許に対して即座に異議を申立てた。その結果、日本の特許局は柳町の異議を認め、キャリア社から出された我が国に対する特許は不成立となったことで、高砂荏原式ターボ冷凍機に関する我が国の特許が成立した。

なおこの特許係争に関しては、筆者は直接に柳町から、キャリア社からの国際的な告訴やこれに関する検察からの取り調べも受けつつ自分が国産のターボ冷凍機を成立させるために最も力を尽くした案件である、と伺ったことを印象深く記憶している。柳町が一人で戦い、国内の特許を成立させたこの経緯については、自らが[7]に語っている。

このような多方面に亘る努力の結果、1931年には大阪中之島にある朝日ビルディング(延床面積14,917m<sup>2</sup>)から180JRT/台×2台を受注し、全館冷房、温湿度制御、並びに、遠隔全自動制御の機能を持つ空気調和設備を完成させた[11]。このビルディングは、夏季は冷凍機を並列運転して冷房のための冷水

を供給し、冬期は遊休する冷凍機を直列運転して、屋上に約370m<sup>2</sup>のスケートリンクのための冷凍設備にするなど、当時の空気調和設備としては最新の技術を集結した斬新な施設として評価された。渡米した際に視察した設備の中で、我が国において実現すべき空気調和関連設備は積極的に実証研究した後に、顧客の納得を得て設計・施工する、技術者としての好奇心の維持と確かな技術力・実行力には、只々敬服するばかりである。図7に朝日ビルディングの全景を示す。

### 3.2 開発機の技術内容

高砂荏原式ターボ冷凍機は、国産6段の電動圧縮機を採用した冷凍機で、今日の冷凍機の原型となる蒸発器、ターボ型圧縮機、凝縮器の3要素で構成された冷凍サイクルからなる。当該ターボ冷凍機の構造説明図を図8に示す[10]。

蒸発器には多管のシェル&チューブ熱交換器を採用し、冷媒は蒸発器の片側に設けられた冷媒循環ポンプで吸い上げられてシェル&チューブ熱交換器の外側から噴霧される。蒸発器はエリミネータを介してターボ型圧縮機の吸入口に接続されているため、蒸発器内の液冷媒は低温でも蒸発する圧力まで減圧され、シェル&チューブ熱交換器に供給した水は冷却される。蒸発した冷媒蒸気は、エリミネータを通過する際に同伴する液冷媒が振り落とされ、乾き冷媒蒸気としてターボ型圧縮機に吸い込まれる。ターボ型圧縮機は、凝縮できるようになった冷媒蒸気を凝縮器に送り込む。

凝縮器は、蒸発器と同じシェル&チューブ熱交換



図7 朝日ビルディングの全景

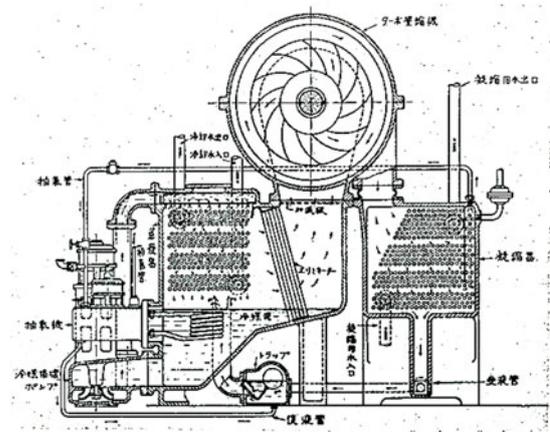


図8 高砂荏原式ターボ冷凍機の構造図

器で構成されている。冷媒蒸気は、常温で凝縮できる圧力まで昇圧され、冷却水に凝縮熱を放熱しながら液冷媒として蒸発器に戻る。この液冷媒管には膨張弁はなく、フロート式トラップにより自動的かつ円滑に冷媒が蒸発器に戻る構造になっている。

高砂荏原式ターボ冷凍機では、全操作が真空装置内で行われるように真空ポンプが設備され、凝縮器の上部から脱気する構造になっている。冷媒の選択には、冷凍機に使用される金属に対する腐食性が極めて小さく、かつ不燃性であること、蒸発温度 5°F (-15°C) と凝縮温度 86°F (30°C) における絶対圧力差が小さい冷媒を選定することで、圧縮機の段数、つまり圧縮機の動力を小さくすることが選定要件であった。この要件を満たす冷媒として、試作段階の冷媒 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub> から、実用機の製作段階では CH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub> に変更されている [8, 9]。

冷媒の熱力学的性質について柳町は、冷媒の温度 vs. エントロピー (T-S 線図) に関する考察として、「効率を論ずるためには理想的な熱機関であるカルノーサイクルを評価基準として、加熱損失を少なくするために、モリエル線図において液相線がより垂直に立っていること、液相線と気相線の交点である冷媒の限界温度が 400°F (204°C) 以上であることを選定要件として検討した」と述べている。

表 1 理想的熱効率に近付けるための冷媒選定

冷媒	臨界圧力	臨界温度	消炎性
	MPa	°C	
NH <sub>3</sub>	11.3	133	×
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	5.51	243	△
CH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	10.3	193	○

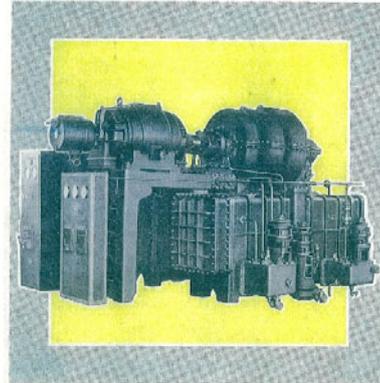
  

冷媒	分子量	蒸気密度	絶対圧力差
	g/mol	kg/m <sup>3</sup>	KPa
NH <sub>3</sub>	17.0	0.708	930
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	96.9	4.04	85.5
CH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	84.9	3.54	126

更にターボ冷凍機の冷媒とした C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub> は、カルノーサイクルを評価基準として比較したときに、「熱効率が高いこと、ターボ冷凍機の冷媒として気体の比重 (分子量) が大きいことから圧縮段数が少なくて済む」ことに言及している [7]。

高砂荏原式ターボ冷凍機の当時の販売拡大用カタログを図 9 に示す。このカタログには、本ターボ冷凍機について、以下の特長が示されている。

劃期的理想の新冷凍機  
高砂荏原式ターボ冷凍装置  
絶対安全・取扱簡便・経費僅少



高砂暖房工業株式会社

図 9 高砂荏原式ターボ冷凍機のカタログ [12]

- ・全装置が真空容器内で作動 (絶対安全)
- ・タービン式圧縮機の採用 (過剰圧力の皆無)
- ・運転状態 (低振動レベル, 静寂)
- ・反動作用 (基礎工事・据付費僅少)
- ・全自動制御を採用 (取扱い簡便, 人件費節約)

このカタログは 1937 年から 1938 年の間に制作されたものと推察され、昭和初期の 1931 年から 1938 年までの納入先の記載がある。記載されている納入先は 8 年間に 42 件であったが、それらを用途別の割合で示したのが、図 10 である。

特徴的なことは、当時盛んであった朝日新聞社本社の社屋など大型建築物への設置に加えて、繊維工業への導入割合が非常に大きいことである。

これは、当時世界に向けて急激に成長していた紡績産業 (とくにレイヨンの製造) が、繊維への吸水量が室内の温度・湿度に大きく依存するために、空

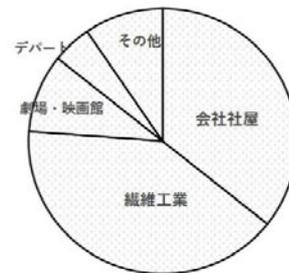


図 10 昭和初期におけるターボ冷凍機の納入先割合

気調和技術を必要としていたことによる。これを「産業空気調和」と呼んでいる[2]。

キャリアが空気調和技術を開発したのも、印刷の精密化によって印刷機周辺の温度・湿度を一定に管理する「産業空気調和」のためであった。更に、キャリアは印刷工たちが印刷機周辺で昼食を食べるようになったのを見て、「居住空気調和」に思い至ったといわれている[13]。また、キャリアは空気調和設備が大きな劇場にも有効であることにも気付いていた。当時、夏の劇場・映画館は非常に暑くて不快な場所であったが、キャリアは1925年にマンハッタンのパラマウント社の大きな映画館に空気調和設備を導入して、成功している[13]。

柳町のターボ冷凍機も、最初の稼働は東京築地の東京劇場（1931年）であったことも[2]、軌を一にしている非常に興味深い。確かに、まだ家庭用エアコンが普及していなかった当時、夏に映画館や百貨店に行く楽しみの一つは、「涼」を求めることにもあったことが思い出される。

#### 4. ヒートポンプの開発

熱力学の体系化に貢献したロード W.T.ケルビン（本名は William Thomson）は、熱機関（カルノーサイクル）とヒートポンプ（逆カルノーサイクル）が表裏一体であることを理解していた。1852年に発表した「空気の流れを用いて建物の暖房・冷房を行う経済性について」の中で、ヒートポンプの詳しい作動原理とその原理的な効率を説明している[14]。

この原理に基づき、1926年に京都帝国大学の大家要教授は、「工業の大日本」誌6月号の論文[15]の中で「燃料節約の一策として冷凍機を暖房機として流用する議」という表題で、この原理の正当性を体系的に論じている。

柳町はヒートポンプに大いに興味を抱き、1929年の渡米の際にキャリア（図11）との面談において、遠心冷凍機を暖房に用いることの実現可能性について質問している。

キャリアの「有望である」とのコメントを得て、1930年には高砂荏原ターボ冷凍機の試作時に、ヒートポンプとしての機能・性能に関する試験を実施して実用化への確信を深めた[7, 8]。

ターボ冷凍機に関する講演会において会場との質疑応答の中で柳町は、「ターボ冷凍機をヒートポンプ機（暖房機）としての使用は可能か」と問われ



図11 1915年（キャリア社を興こした年）のキャリア（柳町が面会したのは、この14年後にあたる。©Carrier Corporation）

た際に、「この機械なら従来からロード・ケルビンが提唱していた冷凍機を暖房機に使う原理を実現できると考える」と回答している。また、「ヒートポンプは、冷房・暖房の両方を必要とする日本の気候に適合している」、「我が国には豊富な地下水資源があり、地下水の熱利用によりヒートポンプの熱効率は更に高くなるから、消費電力量は少なくなると確信している」、「一日も早くヒートポンプを実現したい」とも述べている。これら技術に対する興味と先駆的な研究開発能力、並びに、実行力には改めて驚かされる。

1934年11月期の高砂暖房工事の営業報告書のなかで、「受注先が拡がっているのは（中略）特ニ空気調和装置ノ必要ナルコトカ広ク認識セラルルニ至タル結果ナリ（後略：下線は筆者）」との記述があり、ここで初めて、我が国で「空気調和」の用語が使用されたと考えられている。

#### 4.1 ヒートポンプ方式による暖房設備

我が国で最初のヒートポンプ方式による暖房設備は、兵庫県御影町にあった村山長拳氏の私邸（木造和風住宅2階建230m<sup>2</sup>）に、1932年に設置された。

当初は別設備によって冬期の電気暖房と2階寝室（60m<sup>2</sup>）の冷房を行う設計であったが、冷凍機を用いた冷暖房一体機能を提言した結果、同氏のご了解を得たことで我が国最初のヒートポンプ式暖房が実現した[1, 2]。図12に村山長拳邸に設備された我が国で初めてのヒートポンプ式暖房の系統図を示す。

なお、この神戸市御影には、国の重要文化財に指

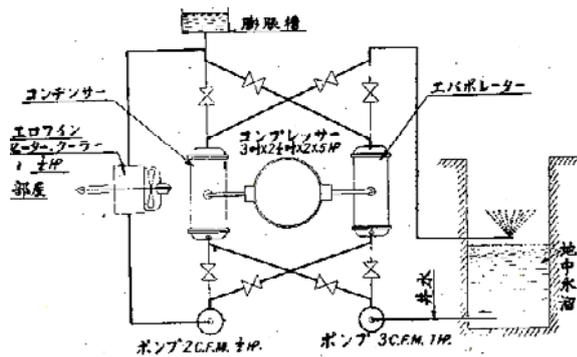


図 12 我が国初のヒートポンプ式暖房の系統図

定され香雪美術館として現在も保存されている朝日新聞社初代社主の村山龍平邸があるが、ヒートポンプの設置された村山長拳氏邸は、同一の敷地内にあったものの村山家2代目当主の私邸であり、当時の建物は改築のために1965年頃に解体され現存はしていない[16].

#### 4.2 ヒートポンプ方式による冷暖房設備

1937年には、京都電燈の本社（現関西電力京都支店）の地下1階/地上8階、延べ床面積10,619m<sup>2</sup>に、高砂荏原式ターボ冷凍機130HP/台（夏期100JRT, 冬期80JRT）×2台により、ボイラや電熱ヒータを一切使用せず、世界最初で最大規模の地下水を熱源としたヒートポンプ式全館冷暖房空気調和設備が施工された[1, 2, 14].

図13には京都電燈（現関西電力京都支社）の本社の外観を、図14には地下の機械室に設備された井水を熱源とするヒートポンプを示す。

筆者は、当該社屋において冬季の外気からヒート



図 13 京都電燈の本社社屋の全景  
（現関西電力株式会社京都支店社屋）

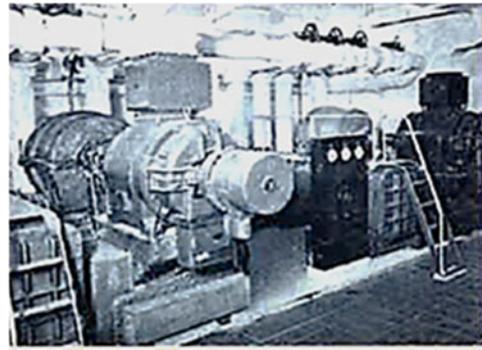


図 14 京都電燈本社社屋の機械室の井水熱源ヒートポンプ設備

ポンプの熱源を得るヒーティングタワー（夏季は冷却塔として同機を使用する）の原型を視察した際に、当時、保温・防音材であった炭化コルク（黒色）が機械室内壁全面に施工されていたことを目の当たりにして、美術品を見たような感動を記憶している。

図15は京都電燈の本社社屋に納入されたヒートポンプ式冷暖房設備の説明図である[18]. この社屋は全館冷暖房完備であったために、第二次大戦後すぐにGHQに一部接收された時期がある。高度で精緻な全自動で運転制御される冷暖房システムに驚いた米軍の技術者は、本国の空気調和に関する専門誌（現ASHRAE：米国暖房冷凍空調学会）に報告記事を投稿したほどであった。

その後1962年に施行された「建物用地下水の採取の規制に関する法律」により、施設の一部が使用不可能になったが、1970年頃からの我が国の高度経済発展に伴い、直接的に燃料の燃焼に依らない空気熱源ヒートポンプは、再度注目されるようになり、今日の全盛に至っている。

#### 5. おわりに

筆者は、入社年の4月から12月中旬までの毎週木曜日に目黒区にあった柳町（以下、先生と記す）の事務所に伺い、空気調和設備の初歩から技術者としての心構えまで、ご自身の体験や設備設計・施工に係るエピソードをご教示頂く機会を得た。先生からご教示頂いた数々の話のなかから、今でも記憶に残る事柄を以下に紹介させて頂く。

最新の技術の本質を見抜く先生の卓越した洞察力の源は、世界中から有意な技術等をいち早く見出して我が国に紹介し、輸入を手掛けていた大手機械



- [6] 冷凍, 日本空調冷凍学会, **50** (578), (1975) 982.
- [7] 柳町政之助, 我国に於けるターボ冷凍機の誕生を懐古して, 冷凍「ターボ冷凍機特集号」, **30** (332), (1955) 218-222.
- [8] 山岸靖一, 大岩順二, 衛生工業協會誌 (現 空気調和・衛生工学会誌) 「ターボ冷凍機に就いて」 **5** (6), (1931) 397-430.
- [9] 大岩順二, 冷凍「ターボ冷凍機始期の思い出」, **30** (332), (1955) 223-224.
- [10] 暖房-冷房-換気, 温湿度調整装置, 高砂暖房工事株式会社, (1937) 1-9.
- [11] 空気調和・衛生設備技術史; 空気調和・衛生工学会編, 丸善, (1991) 48.
- [12] カタログ「画期的理想の新冷凍機 高砂荏原式ターボ冷凍装置」, 高砂暖房工事株式会社, (1937~1938).
- [13] Steven Johnson, “How we got to now, Six innovations that made the modern world”, (2014), Nutopia,. (訳)「世界をつくった6つの革命の物語」, 大田直子, (2016), 朝日新聞出版.
- [14] 日本冷凍史, 日本冷凍空調学会, (1998) 376.
- [15] 大塚 要, 工業之大日本, **23** (6), (1926) 4-9.
- [16] 香雪美術館, 調査依頼に対する回答, (2019).
- [17] 高橋 惇, 第 56 回日本伝熱シンポジウム講演要旨集, nhts56-I23, (2019).
- [18] 柳町政之助, 衛生工業協會誌 (現 空気調和・衛生工学会誌), **12** (6), (1938) 477.

#### 冷凍トンに関する単位の注釈

日本冷凍トンは, 1 メートルトン (1,000kg) の 0°C の水を 24 時間で 0°C の氷にするための熱量である. 水の凝固の比エンタルピーは 79.68kcal/kg (334kJ/kg) であるから,  $1 \text{ JRT} = 9.68 \text{ kcal/kg} \times 1,000 \text{ kg} \div 24 \text{ h} = 3,320 \text{ kcal/h}$  (3.86kW) と定義されている.

米国冷凍トンは, 2,000lb (907.2kg) の 0°C の水を 24 時間で 0°C の氷にするための熱量である. 水の凝固の比エンタルピーは 144BTU/lb であるから,  $144 \text{ BTU/lb} \times 2,000 \text{ lb} \div 24 \text{ h} = 12,000 \text{ BTU/h} = 3,024 \text{ kcal/h}$  であり, 単位換算すると  $1 \text{ USRT} = 3,024 \text{ kcal/h}$  (3.52kW).