我が低温人生

—小型冷凍機を中心にした低温技術の歴史的経緯と将来への提言—

柳 井 正 誼

岩谷瓦斯(株)滋賀工場 滋賀県守山市勝部 4丁目5-1

(1999年11月30日受理)

My Cryogenic Life—The History of Cryogenic Technology through Cryocooler Development in Japan and the Future Aspect—

Masayoshi YANAI

Iwatani Industrial Gases Corporation, 4-5-1, Katsube, Moriyama541-0041

Permanent address: 3-7-15 Wakamatsu-dai, Sakai 590-0116, E-mail: masa.yanai@nifty.ne.jp

(Received November 30, 1999)

1. はじめに

平成11年6月24日、私は常勤勤務を終え非常勤になった。実質的な退職である。昭和33年に大阪酸素工業(株)に入社、昭和62年に岩谷グループに移り、以来合わせて41年余に及ぶ会社勤めであったが、空気分離器の運転、液体窒素による食品冷凍から数えて41年、ヘリウム液化機の開発から数えれば37年の長きにわたる低温技術一筋の人生であった。退職後、編集委員会から学会誌への執筆依頼があったが、低温の歴史については、武藤先生(元東北大)¹⁾、渡辺先生(元北大、山形大)²⁾、信貴先生(元大阪市大、岡山理大)³⁾の回顧談がすでに学会誌に掲載されている。私としては関西支部の発足20周年記念に執筆した「我が低温人生」⁴⁾に、その後執筆した「我が低温人生—II、小型冷凍機の歴史的経緯」(未公開)を合わせて、「我が低温人生—総括版—」として纏め直すことにしようと考えて問い合わせたが、その内容で編集委員会の了解が得られたとの連絡があった。民間会社一筋に、しかも国の大きなプロジェクトにもほとんど参加せずに、自らの道だけを歩いてきた私のような者に、こんな機会を与えて頂いたことに心から感謝の意を表したい。先般、日本酸素の門奈氏が逝去された。もう今では門奈氏の名前を知っておられる方も少ないと思う。国の内外を見ても、大島恵一先生(元協会会長)、安河内昂先生(元日大)、平井章先生(元京大)、山本

純也先生(元核融合科研)、スコット博士(元ボルダー低温研初代所長)、コリンズ博士(コリンズ液化機の開発者)、ギフォード博士(GM冷凍機、パルス管冷凍機の開発者)、ケーラー博士(スターリング冷凍機の開発者)、バンス博士(元米国低温協会会長)、バーミングハム博士(元ボルダー低温研所長)など親しくしていただいた方々が亡くなられた。これからの世代を担う若い人達に、以下に述べるような歴史的事実を知っておいて欲しいと考えるようになった。歳のいったせいかもしれないが、是非ご一読を乞いたい。

2. 低温事始め

大学を卒業して大阪酸素工業(株)に入社したのは昭和33年(1958年)である。世の中は鍋底景気と言われた大不況の中で初任給は1万2千円だった。この給料の安いのに驚いたが、会社に入ってから仕事のないのにはもっと驚いた。当初は空気分離器の運転(三交代勤務)、技術部に移ってからは液体窒素を用いた食品冷凍の研究に従事した。ヘリウム液化機の開発研究にめぐり合ったのは昭和37年(1962年)のことである。これは大阪酸素と東大・大島研究室との共同研究で、通産省の鉦工業助成金を得るために「ヘリウム液化機とそれを用いた蒸着装置の開発」という長いタイトルの研究テーマであった。開発スタッフとしては東大・大島研の石崎嘉宏氏(現エクテイ)、松原洋一氏(現日大教授)、大阪酸素からは筆者と西田啓一(現産

Fig. 1 Freezing trailer using LN_2 .

業創造研), 川口悦治 (現岩谷瓦斯) が中心になったが, 実質的リーダーの石崎氏を含めて全員 20 歳代というフレッシュな顔触れであった。若いというだけでなく, 大阪酸素のスタッフは「ヘリウムで何ですか?」といった質問をするくらい, 極低温経験ゼロともいえる技術レベルであった。当時の大阪酸素が何故ヘリウム液化機を開発テーマに選んだのか筆者もよく知らないが, ヘリウムが最も液化しにくいガスであることを知っておられる大島先生の進言と, 新しいものの好きの大阪酸素の 2 代目社長の鈴木金男氏のフェイズがうまく合ったのではないかと推測している。当時のヘリウム液化機の実情は, 昭和 28 年 (1953 年) に東北大・金研に米 ADL 社のコリンズ式液化機の第 1 号機が設置され, 昭和 36 年 (1961 年) 頃までにコリンズ式ヘリウム液化装置が, 三菱電機, 日本酸素, 住友重機の 3 社によって次々に商品化された。また, 昭和 33 年 (1958 年) から数年の間に東大・理工研の故大島恵一, 永野弘両先生のグループと, 大阪市大の奥田毅, 信貴豊一郎両先生のグループによりそれぞれカスケード式のヘリウム液化装置が開発されている。我々の開発は後発なので, コリンズ式でないものを目標に設定した。

2.1 ヘリウム液化機の開発

コリンズ式ヘリウム液化機はコールド・ボックス内がヘリウム雰囲気なので, 熱交換器は温度勾配に沿って縦に直列に配置されているが, 我々は真空断熱槽に熱交換器をコアキシャルに配置し, 第 1, 第 2 熱交が第 3 熱交の, 第 3 熱交が膨張エンジンの放射シールドになるように考えた。しかし, この開発計画は, 真空中に各種の機器を配置するということから大変な困難を伴った。低温になるほど洩れやすいヘリウムガスを真空断熱槽に一切漏らしてはならないという洩れ防止

技術の確立である。購入した圧縮機の本体の壁から, 引き抜きのキューロニック管や SUS 管のお腹の真ん中からヘリウムガスの泡が出てくるし, 洩れない SUS の薄板の付き合わせ溶接技術の開発やその洩れ対策に, 1 年以上の年月を費やした。筆者は膨張エンジンを主として担当したが, 現在のプラスチック製のピストンと違って, 焼入れ鋼にラビリンス溝を切りミクロンオーダーの寸法に仕上げるという大変な仕事で, 2 年近くの間トラブルとの格闘を続けた。接続部は純アルミのパッキンに真空用のシリコングリースを薄く塗布することでほぼ完全に真空洩れを止めることができたが問題は膨張エンジンの入出口弁で, どうしてもシートの洩れを止めることができない, ADL 社のコリンズ式液化機が弁材に皮を使っているということで, 各種の皮をテストしたがうまくいかない。万策尽きて石崎氏に相談したら「南極や北極で泳いでいる動物の皮なら低温に強いのではないか?」という, 今なら笑い話になるようなコメントを貰った。藁をも掴む気持ちで 1 カ月後, 某水産会社を経由してトドの皮を手に入れた。自分自身には「トドのつまりと言うくらいだから, これは最後の切札である」と言い聞かせたが, 結局これでも洩れを止めることができなかった。問題を解決して下さったのは, 当時バルカー社の中央研究所の所長をしておられた渡辺博士 (皮の権威者) である。皮に添加物を入れることで極低温における弁端からの洩れは完全に止めることができた。皮の種類は別にトドである必要はなかったのである。それにしても, 20 歳代の若造であった筆者に 1 年近くもよく付き合ってくれたと今だに感謝している。2 年半が経過して, 装置は順調に稼働しているのにヘリウムがなかなか液化しない。当時関西での低温の権威者は大阪市立大の信貴先生であり, 会社の同僚の西田が大阪市立大の出身ということもあって, 信貴先生にアドバイスを頂こうということになった。先生がオックスフォード大帰りとお聞きしたので, 手土産に英国製のカン入り煙草を闇で手に入れ, 大阪梅田近くの焼け跡の小学校に間借りしておられた信貴先生の部屋を西田と 2 人で訪問した (当時杉本町の大阪市立大のキャンパスは進駐軍に占拠され, 米軍のキャンプになっていた)。

焼け残りの汚い小学校の教室を訪れ, 「ごめんください」と声をかけると隣の部屋から油まみれの汚い人が出て来られたので, 「信貴先生にお会いしたいのですが」と言うと, ボソボソした声で「私が信貴です

が」といわれた。これが私と信貴先生の初対面なのだが、オックスフォード大帰りの少壮研究者というイメージを頭の中に描いていたので、あまりのイメージ違いに大いに驚いた（もっともこれ以後も信貴先生には驚かされずめであるが）。さっそく、「ヘリウムがどうしても液化しないのですが？」と質問したところ、「あんなもの、どないしても液化しますヨ」とボソボソと答えられた。以後の永年のくされ縁のスタートにふさわしい強烈なインパクトであった。後ほど判ったのだが、低温の温度計測の技術が未熟であったのと液化の現象の確認の方法が判らなかったのが原因で、それらを克服して一度液化に成功してみると、ヘリウムなんて何時でも液化できると思うようになってしまった。この時に開発したヘリウム液化機は8リッター/時で、3台作ったが商品として売れたのは玉川大学へ売った1台だけである。しかし、低温の判らない連中が集まって3年強で商品化までもっていったのは、ひとえにリーダーの石崎氏の手腕によるものである。開発の間、沢山の英語の論文を読破し、低温技術を学んだが、最も強く思い出に残っているのは、よく徹夜したこととよく酒を飲んだことである。その後、液化容量の小さい装置の注文があったが、容量の小さい膨張エンジンを作るのが難しいので、当時大阪酸素が扱っていたオランダ・フィリップ社製の20 Kスターリン

Fig. 2 8 l/h, He-liquefier (Osaka Oxygen Co.).

グ冷凍機を予冷系に用いて2リッター/時のヘリウム液化機を開発した。しかし、これも2台売れただけであった。まだまだ4.2 Kの需要の底辺は浅かったとしか言いようがない。

2.2 クライオ・ポンプと蒸着装置

冒頭に述べたように、開発テーマはヘリウム液化機でなく、ヘリウム液化機を用いたクライオ・ポンプによる蒸着装置であったので、ヘリウム液化機が順調に稼動し始めてからはクライオ・ポンプに研究⁵⁾の焦点が絞られた。クライオ・ポンプは当時、電総研の中山勝矢氏・秋山好胤氏らのグループが研究をしておられたから、研究時期としてはほぼ同じではなかったかと思う。低温をやっていたので真空のことはある程度理解していたが、蒸着となるとまるで素人なので、東京大学の富永五郎先生の指導を受けることになったが、実務は当時まだ助教授だった金原繁先生によって行われた。当時はまだ今ほど半導体が盛んでなかったので目標があいまいであったが、クライオ・ポンプを用いれば蒸着物の品質に残留ガスが悪い影響を与えないということを確認した。この研究のおかげで、真空に関する諸々の技術、計測の手法などを勉強することができ、これ以後の低温研究に大いに役に立ったことは言うまでもない。

2.3 その他、諸々の研究経験

防衛庁の仕事で、空対空ミサイルの先端に付ける赤外線検知器用冷却器の研究開発というテーマが私の所へころがり込んできた。理由はよく判らないが上司の命令である。しかしこれには困難な条件が付いていた。まず空対空ミサイル発射後1秒以内に90 Kの低

Fig. 3 Mini-cooler.

温を生成し、赤外線検知器を正常に動作させること、防衛庁の立会い検査まで時間がないので、数カ月後に完成させることというタイムリミット付きの研究テーマである。キャピラリーにフィンを付け、直径1センチ、長さ3センチ位のいわゆるミニクーラーと呼ばれる熱交換器を試作するのだが、最初は8秒、種々改善の結果4秒近くにまでなったが、1秒にはほど遠い。この時は、ガス源に150 kg/cm²のボンベを使用していたが、種々検討の結果、ガスの種類としてNTU値の高いアルゴンを選び、先端のJ-T弁までガスを早く到達させるためにガス圧を上げる必要があると結論を下した。早速、特殊圧縮機のメーカーに見積もりを依頼したが、納期が1.5年と話にならない。知恵を絞った結果、ステンレスで2,000気圧の耐压容器を作り、アルゴンボンベに接続して容器を液体窒素に漬けて、液体アルゴンを満たんにした上で常温にもどすという方法を考えた。ボイルシャルルの法則で単純に計算すると、圧力は千数百気圧位になると思われたが、圧力計が1,000気圧のものしか手に入らない。1,000気圧を超えれば手でガスブローすることにしたが、1,000気圧近くになると圧力上昇スピードが早く冷汗をかきながら作業を行った。後で判ったのだが、NBSのアルゴンガス物性資料を見ると、アルゴンは圧縮係数が大きく、液体が全量常温ガスになると3,000気圧以上になると知り驚いた。防衛庁の立会い実験では、電磁オシロとストップウォッチの両方で計測し、1秒以内に液体アルゴンの発生することを確認して大いに面目をほどこした。この研究で沢山なことを学んだのは言うまでもないが、後ほどこの案が私以外の人の名で特許申請・登録されていることを知り、工業所有権はアイデアの段階で申請しておく必要のあることを思い知らされた。

極低温熱電対はクライオミニ開発研究の副産物である。常温から10 Kまでの温度をモニターする良い温度計のないのに気づいて開発⁹⁾を考えた。金・鉄熱電対がオックスフォード大学で開発され、NBSから起電力表まで出されていることは知っていたが、国内ではまったく商品化されていなかった。蒸着装置の研究で使っていた金パッキンの残骸が沢山あったので、徳力本店に金+鉄0.07 atm %の合金の製作を依頼した。幸運だったのは、当時徳力本店の社長をしておられた故関根義夫氏がJISの熱電対の委員をしておられ、大変熱心だったことである（但し、この鉄を微量に含んだ金合金の製作には、かなり苦勞されたようで

ある）。さらに幸運だったのは、科学技術庁の極限科学の委員会で一緒に三井清人氏（当時、計量研・第一研究部長、現・日本品質保証協会、後で知ったのだが、紀子妃殿下の叔父さんにあたられるそうである）が国際温度基準の日本代表委員だったこともあって、いろいろアドバイスを頂いた。この温度計は常温から極低温までモニターできる簡便性が受けて、現在も大いに売れている。

3. 小型冷凍機

昭和41年（1966年）、第1回国際低温工学会議（ICEC-1）が京都の国際会議場で開催され、これまで文献資料で名前だけしか知らなかった著名人が大勢来日した。当時新しい冷凍サイクルであるギフォード・マクマホン・サイクル（GM サイクル）を開発して世界の注目を集めていたギフォード博士も来日された。ギフォードはスコッチヨーク駆動によるGMの原理特許をADL・500 DIV.（後のCTI社）に譲渡し、自分はニューマチック駆動のGM冷凍機（ガスバランシング法と呼ばれている）を開発、クライオメック社を設立して、この冷凍機の製造・販売を始めていた。日本でこの冷凍機を扱ってくれる会社がないかという話が、大島先生を通じて大阪酸素に持ち込まれた。鈴木金男社長がこんな話に乗らないはずがない。

Fig. 4 At ICEC-1 (Dr. Gifford, Author, Dr. Scott from left).

技術導入のために筆者が3カ月米国に派遣されることになった。1ドル=360円、滞在期間の如何を問わず持ち出し外貨は1,500ドルという時代である。

3.1 GM 冷凍機との出会い

米国への研修期間は3カ月である。当時米国東海岸への直行便はなく、ホノルル、サンフランシスコを経由してニューヨークまで飛ぶのだが、飛行機はダグラス DC 8、各都市間それぞれ6時間、ストップ時の給油と乗務員の交代に各2時間、東京からニューヨークまで合計22時間の長旅であった。研修場所はニューヨーク州シラキュース市にあるクライオメック社で、ニューヨークのニューアーク空港からローカル線の飛行機に乗ってさらに1時間かかる。ギフォード博士はシラキュース大学の航空機械工学科の教授を兼務しておられ、研究はほとんど大学の研究室で行われていたので、大学と会社を行ったり来たりの生活になった。クライオメック社の総支配人はギフォードの元でパルス管冷凍機をテーマに博士号を取得したばかりのロングスワース博士（現・APD-Cryogenics）で、年は私と同年輩であった。後にソルベイ・サイクルを改良して、ロングスワースがエアプロダクツ社でディスプレイックス冷凍機を、筆者が大阪酸素でクライオミニ冷凍機を開発するのだから、考えてみれば奇妙なトリオだった訳である。

これまでヘリウム液化機の開発で、10 K を出す膨張エンジンを担当し3年間苦心惨憺した後だけに、GM 冷凍機を初めて見た時は驚いた。実に簡単な構造でディスプレイサーはプラスチック製、しかも信頼性が非常に高い。ディスプレイサーの中に200メッシュの銅合金の金網と小粒の鉛球を用いた蓄冷器が内蔵さ

Fig. 5 At Dr. Gifford's laboratory (Dr. Longworth, Dr. Gifford, Author from left).

れており、この中をガスがペリオディックに流れ、コンタミに対してある種のフィルターの効果があり信頼性を支えていることが判ってきた。私のライフワークになる小型冷凍機への情熱はこのカルチャー・ショックによって培われた。ギフォード博士はGM サイクルとパルス管冷凍機を開発した天才であるが、自宅、大学の教授室、別荘のいずれの書棚にもヤコブ著の“Heat Transfer”⁷⁾ 上下2巻を除いて低温の書籍はまったくない。不思議に思って先生に質問したら、答えは「人のやったことを読んででも仕方がない」であり、正に天才だと思った。このシラキュース滞在中の話は低温工学に投稿した「W.E. Gifford の死を悼む」⁸⁾ に詳しく記述しているので参照されたい。

3.2 小型冷凍機の実用装置

米国から帰国した後は、GM 冷凍機の実用研究が仕事の中心になった。この頃は東大・大島研との共同研究も終了し、松原洋一氏（現日本大学・原子力研究所・教授）が大阪酸素の筆者の研究室に来てくれたので、後にクライオミニ冷凍機として完成する小型冷凍機の基礎研究は実質的に松原氏がリーダーシップをとってくれ、筆者はもっぱら GM 冷凍機の実用研究に専念した。当時関西で極低温の研究をしていたのは、大阪市大の奥田・信貴グループ、三菱電機の明石・小俣グループ、大阪酸素の筆者・西田グループの3つ位であったが、小型冷凍機に関しては筆者のグループが日本で唯一であった。GM 冷凍機の実用第1号は、東大・工・原子力および東大・原子核研究所向けに設計したハイドロジェン・ターゲットである。小型冷凍機を用いたクライオスタットなど誰も経験していないだけに、石崎嘉宏氏（現エクティ）や平林洋美先生（元核融合科研・教授）、土井義城先生（現高エネ研）に大変お世話になった。また GM 冷凍機を予冷系に用いた4.2 K-2 W の冷凍機⁹⁾を開発し北大・工・原子力工学科に納入、さらに冷中性子線源用のクライオスタット¹⁰⁾も幾つか設計したが、この時には北大・原子力の故井上和彦教授にいろいろアドバイスを頂いた。中性子回折については東北大・物理の故石川義和教授にいろいろ教えて頂いた。これ以外にも、ESR、カロリーメトリ、赤外線検知器、液体ヘリウムの蒸発防止、温度計校正装置など随分いろんなものに挑戦した。これは低温技術の経験を積むという以外に、筆者の低温の世界における人脈の構築に大きな役割を果たしてくれた。昭和46年に旧国鉄がリニアモーターカーの開発を考えて技術委員会を発足させた

Fig. 6 4 K-2 W refrigerator using GM-cryocooler.

時、筆者もこれに加わった。この委員会で1編成-1冷凍システム、1車両-1冷凍システムなどが提案されたが、小型冷凍機を用いた1クライオ-1冷凍機を提案したのは筆者1人だったことを考えると、小型冷凍機はまだ世の中で認知されていなかったのである。

3.3 クライオミニ冷凍機とクライオポンプ

GM 冷凍機の応用装置を随分沢山開発したが、1ドル=360 円の時代で冷凍機が4 百~5 百万円、クライオスタットが2 百~3 百万円、合計6 百~8 百万円にもなると高価でなかなか売れなかった。なにしろ東大の教授1 人の年間講座費が百万円位しかなかった時代である。百万円冷凍機を作ろうというのが我々の目標になったのだが、GM サイクルは特許で固められており手出しができないので、ソルベイという古い冷凍サイクルを、モデファイ¹¹⁾することにした。研究室には筆者、松原洋一、川口悦治、大嶋勲夫、鈴木徳彦の5 人に設計課から3 人の応援を頼み、開発に3 年の日時を要した。それでも3 年で開発できたのは手元に GM 冷凍機という良いサンプルがあった故だと考えている。研究室から製造課へ技術を移管したが性能が出ない。しまいには失敗製品ではないかなと言われた。止むなく研究グループを解散して川口以下を製造に乗り込ませる大手術を行った。その結果クライオミニは息を吹きかえし性能が出るようになった。我々は百万円冷凍機ができたと言ったが、営業が積算すると売値は210 万円ということになってしまった。商品は完成したもののビジネスは低調であった。初年度の昭和47 年から5 年間で売れたのはたったの32 台のみ。いつ潰されてもおかしくない状況の中で極低温部門を残せたのは三菱電機のお陰である。リニアモーターカー

Fig. 7 Cryo-mini cryocooler (Iwatani Industrial Gases Co.).

用として私が提案した1クライオ-1冷凍機のシステムに三菱電機が興味を持ち、小型冷凍機の技術がなかったので大阪酸素に共同研究を申し入れてきたのである。この話は荻野治氏が強力に押し進めて下さったとのこと、感謝の極みである。然しこの共同研究も2 年で終了し、苦境の打開策を再び考えねばならなくなった。当時は半導体工業の勃興期で、日本真空がクライオポンプの開発を計画しているというニュースが入って来た。当時日本真空の社長は林主悦氏であったが、日大の故安河内昂教授とは東大・物理の先輩後輩の仲で面識があったので、早速に訪問し面談する機会を持

つことができた。当時、小型冷凍機についてはCTI社のクライオダイン、エアプロ社のデイスブレックス、大阪酸素のクライオミニの3機種しかなく、それぞれが特許で固められていた。日本真空ではCTI、エアプロの小型冷凍機を用いて、すでにクライオポンプの商品開発を始めていたが、遅ればせながら我々のクライオミニもこれに加えて頂いた。当時、日本真空の常務をしておられた小宮宗治氏にいろいろアドバイスを頂き、最終的にクライオミニを採用して頂くことができた。日本真空とはOEM契約を結び、日本真空がCTI社との合併会社アルバッククライオ社を発足させ、小型冷凍機の自社生産を始めるまでの20年余の間に約2千数百台を売った。クライオポンプは正に小型冷凍機を工業レベルにまで引き上げた最大の功労者と言える。昭和50年代の中頃、GMサイクルの原理特許が切れ、このクライオポンプの市場を目指して後発メーカーが陸続と出現した。米国ではバルザース、バリアン、CVIの各社、欧州ではライボルト・ヘラウス(独)、レール・リキード(仏)、ガリレオ(伊)、エドワーズ(英)、日本ではアルバッククライオ、ほくさん、三菱重工、日立製作所、アイシン精機、住友精密、住友重機、ダイキン、三菱電機、東芝の各社がある。その後紆余曲折があり、エアプロは技術を米国のAPD-Cryogenics社と日本のダイキン工業に譲渡、バリアン社の技術は日本の荏原製作所に譲渡された。これ以後、戦線から脱落した企業も数社を数える。我々のクライオミニもアルバッククライオ社の自社生産によって需要が激減し、クライオポンプ以外の需要を開拓すべく悪戦苦闘の日々を経験したが、悪い時には悪い事が重なるもので、大阪酸素に英BOC社の資本が入り不採算部門切捨ての矢面に立たされてしまった。

捨てる神あれば拾う神ありという古い諺があるが正にその通りで、工場敷地、建屋、商権、従業員約30人を含めて丸ごと岩谷産業が引き受けてくれ、クライオテクノという新会社を設立してくれた。その後この会社は何度かの合併があり、イワタニプラントック、岩谷瓦斯と社名は変わったが、大阪酸素の小型冷凍機部門の技術を引継ぎ拡大し続けている。

3.4 新しい蓄冷材の開発

小型冷凍機の歴史的経緯の中で、どうしても外すことのできないことがある、それは10 K以下の温度領域で比熱の大きくなる新しい蓄冷材とその加工方法の開発である。一時期磁気冷凍機の開発が盛んで、この

研究の中核におられた東京工業大学の橋本巍洲教授が低温蓄冷材としてGGGを使っておられたが、この研究が下火になるにつれて研究の目標が低温蓄冷材の開発にシフトし、その結果東芝との共同で Er_3Ni という素晴らしい材料が開発された。その後いろいろな蓄冷材が開発されてきたが、先鞭をつけられた橋本先生の功績は大きい。同時にこの材料を0.5ミリ径の真球にする加工技術を開発された東芝のLSI材料研究所の佐橋政司氏の功績も大きく、何れも画期的な業績である。この画期的な蓄冷材のお陰で小型冷凍機はその信頼性を維持したまま4.2 Kを実現することが可能となったし、後述するパルス管冷凍機の性能もこの蓄冷材のお陰で随分向上した。この研究成果に対して、平成8年度の岩谷直治記念賞が授与されたが、筆者の個人的評価をあえて言わせてもらうなら、戦後日本の低温工学の中で第1等の発明と言えるのではないかと考えている。

3.5 パルス管冷凍機

パルス管冷凍サイクル²⁾もギフォード博士によって開発されたものである。筆者の手にギフォードの開発したパルス管冷凍機があるが、2段冷凍機で120 K迄しか温度が下がらず非常に効率が悪い。低温部に稼動物(ピストンやディスペンサー)がまったくなく、画期的な冷凍サイクルであるにもかかわらず、温度が下がらない、効率が悪いという理由で長年放置されてきた。この冷凍機に活を入れたのが旧ソ連のミクリン博士である。パルス管のホットエンドにオリフィスを介してバッファタンクを取りつけたところ性能が一変した。ミクリンは冷媒に空気を用いたがそれでも一段で120 Kを達成し、ヘリウムを用いれば60 Kは可能と予言した。予言通り米NIST(旧NBS)のラデバウ博士がヘリウムを用いて一段で60 Kを達成した。現在ではギフォードのものをベーシック・パルス管、ミクリンのものをオリフィス・パルス管と呼び、第2世代のパルス管冷凍機と位置付けている。筆者も手元にあったギフォードのパルス管のホットエンドに穴を開け、オリフィスを介して1リッターのバッファタンクを取りつけて運転してみたが、性能が一変したので驚いた。このパルス管冷凍機についてはより温度を下げる、より効率をアップする、より出力を大きく取るための研究が現在も盛んに行われており、これら各種の提案、アイデアを一括して第3世代のパルス管冷凍機と呼んで区分している。このパルス管冷凍機の開発の経緯は、筆者がISTECジャーナル紙に

Fig. 8 Pulse-tube cryocooler (Iwatani Industrial Gases Co.).

書いた「パルス管冷凍機」³⁾を参照されたい。このパルス管冷凍機の発展の経緯の中で、記憶に止めておかなければならないことが幾つかある。まず第1にオリフィスを考案したミクリン博士の功績、第2にこの冷凍メカニズムを理論的に解明しようと熱音響理論を構築しつつある筑波大学の富永昭先生、世界で初めてパルス管で4.2 K以下を実現した日本大学の松原洋一先生、ミクリンの予言を明確に実現させた米国 NIST のラデバウ博士、第3世代のパルス管冷凍機でダブル・インレットという画期的な方式を考えた中国・西安交通大学の朱紹偉氏（現アイシン精機）、パルス管内のガスの流れをレーザーを使って目視できる手法を考案された愛知教育大の矢崎太一先生などの功績である。パルス管の研究は現在も世界的に盛んであるが、その行く末がどうなるのであろうか？ 筆者の私見を許していただけるなら、小型冷凍機はその用途によってパルス管冷凍機、GM 冷凍機、スターリング冷凍機等の住み分けの時代が来るのではないかと考えている。

4. 低温工学協会のことなど

社団法人低温工学協会の発足は昭和40年（1965年）の春である。協会の発足について述べる前に、協会の前身である「低温工学懇話会」について触れておかなければならない。この懇話会は昭和36年（1961年）10月30日に発起人会が開かれ、昭和37年（1962年）6月1日の総会をもって正式に発足した。発足当時の役員の顔振れは定かではないが、会長に故

Table 1 Contents

第1巻 第1号—昭和37年（1962年）6月1日刊（20ページ）	
1. 低温工学懇話会の発足まで	門奈五兵（日本酸素）
2. 第7回来 CEC と IIR・Comission 1 の報告	門奈五兵（日本酸素）
3. 第7回（1961年）米 CEC に出席して	永野 弘（東大物性研）
4. 電子冷凍	菅 義夫（東大工学部）
5. 極低温におけるエレクトロニクスの最近の話題	鳩山道夫（株ソニー）
6. 昭和36年度決算報告と事業報告	
第1巻 第2号—昭和37年（1962年）9月1日刊（21ページ）	
1. 超伝導マグネット	菅原 忠（東大物性研）
2. 液体酸素類の貯蔵槽と蒸発について	岡田次郎（株液酸化工機）
第2巻 第1号—昭和39年（1964年）3月1日刊（61ページ）	
1. クライオポンプにおける真空技術	中川 洋（日本酸素）
2. クライオポンプにおける低温技術	佐藤新太郎（日立製作所）
3. クライオポンプに関する討論	富永五郎（東大）、石井 博（電総研）他2名
4. スペースシミュレーション	一の宮虎雄（理化学研究所）
5. 低温における構造材料について	末沢慶忠（東工大）
6. 低温における電気材料	米満博夫（東芝）

神田英蔵先生（元東北大・金研所長），理事に故大島恵一先生（東大名誉教授），故大山義年先生（元東工大・学長），故門奈五兵氏（元日酸・取締役），故鳩山道夫氏（元ソニー・取締役），故袋井忠夫先生（東北大名誉教授），監事として故高橋亘行氏（元日酸・社長），浜田秀則氏（元日本原子力産業・社長）と思われる。発起人会の出席総数は約45人，事務局は東大・原子力の大島研究室におかれた。協会が発足するまでの4年間に会誌が3冊刊行されている，今の若い人達には判らないと思うが，いずれもガリ版刷りの労作である。Table 1に会誌の内容を紹介しておく。

4.1 低温工学協会の発足

低温工学協会の発足は，故メンデルスゾーン博士（オックスフォード大）が提唱された国際低温工学会議の第1回を日本で開くための受皿団体としてである。当時，米国では宇宙開発に伴う低温工学の研究が盛んで，世界の低温工学をリードする米国低温工学会議（CEC）も既に10回の開催を数え，ボルダーにあるNBS低温研究所（現NIST）が世界の低温工学の研究のメッカになりつつあった。これに対してメンデルスゾーン博士の提唱による国際低温工学会議（ICEC）は欧州と日本を中心とするもので，CECが宇宙開発という具体的な目標を持った低温技術を中心に行っているのに対して，ICECはやや低温物理的色彩の強い国際会議になった。協会発足時の経緯を良く御存知の方々の多くが故人になられているので，筆者も詳細については知らないことが多いが当時の記録をもとにしてあえて記述することにする。もし誤りがあればご指摘願いたい。

協会の発足は当然，前述の低温工学懇話会が主体になった。昭和40年（1965年）春の総会で，故大山義年先生を代表とする12名の設立者を選び，会の名前も「社団法人・低温工学協会」と定めて，政府の許可を得るべく活動が始まった。昭和41年（1966年）3月30日，内閣総理大臣並びに通商産業大臣から正式に設立が認可され，必要な登記手続きが行われた。昭和41年（1966年）5月，第1回定時総会において，役員，理事，監事を選任し，懇話会の全てのものが協会に引き継がれることになった。

会長に故大山義年（東工大・学長），副会長：故神田英蔵（東北大・教授），藤崎辰夫（日本プラント協会・専務理事），専務理事：豊田省五（第一技研・社長），理事に故大島恵一（東大・教授），奥田毅（大阪市立大・教授），鈴木金男（大阪酸素・社長），田沼静

一（東大・教授），永野弘（東大・助教授），故門奈五兵（日酸・取締役），故安河内昂（日大・教授）他9名，監事2名が選ばれた（カッコ内は当時の肩書である）。

事務については懇話会の延長で処理され，豊田専務理事と東大・大島研究室のスタッフのボランティア精神によって支えられたと言ってよい。協会活動の中核を占める協会誌の第1巻第1号は昭和41年（1966年）12月10日に刊行され，季刊誌＝年4回の刊行が目標とされた。発足当時の正会員数は154名，賛助会員数は23社であったが，平成11年（1999年）7月末現在，正会員数1,316名，賛助会員数61社を数えるに至っている。発足の翌年，事務局が東大・物性研の永野弘研究室に移され，会誌の編集局も編集委員長の日大の故安河内昂教授の研究室に移された。その後の協会の運営は専務理事の永野弘先生と編集委員長の故安河内昂先生を中心に行われ，懇話会時代を含めて，故大島恵一先生，豊田省五氏，永野弘先生，故安河内昂先生の4人の方々によって協会は支えられた。第1回の研究発表会はICEC-1を主催したこともあって，協会発足後1年半を経過した昭和42年（1967年）11月1日～2日，神田駿河台にある日本化学会講堂で開催された。発表件数28，出席者数約150名，発表件数の割りには出席者数は多かった。然しこの研究発表会の発足は，これまで物理学会，応用物理学会，電気学会，金属学会，真空連合講演会などに分散して発表されていた低温工学関係の研究報告が一堂に会して聞けるという点で画期的であった。この研究発表会も低温工学会の発足と共に「低温工学・超電導学会」と名称を改め，平成11年（1999年）11月には第61回の開催を迎えた。低温工学会の発足は当時編集委員長だった日大の故安河内昂先生の長年の念願であった。理由の1つは，会誌に発表された論文を学術論文として各大学の内部で認めさせることにあった。しかし，協会を学会にするのはそんなに簡単なことではなかった。最大の理由は，主務官庁の通産省と科学技術庁が，主，従ではなく対等の立場であったからである。この件は，結局安河内先生のご健在の間には実現しなかった。故安河内先生の遺志を引き継いだのが同じ日大の小林久恭先生（現日大・教授）で随分ご苦労されたようである。この問題の解決に大きな力を発揮された故大島恵一先生は東大・教授のままで政府の要請を受けて日本人初のOECDの科学局長を2年間務め，帰国後政府からは閣僚待遇の処遇を受けられるこ

とになり、その後低温工学協会の会長に就任された。2つの主務官庁のもとで協会の中に学会を設けるといふ大仕事は小林先生のご努力も大きいですが、故大島会長の政治力に負うところも大きかったのではないかと推察する。協会の事務局が東大・大島研究室から東大物性研・永野研究室に移され、専務理事が豊田氏から永野先生に引き継がれたのが何時であったか定かではないが、協会発足後そんなに時間の経過していない時期である（正確には永野先生にお聞きすべきと考える）。いずれにしても協会発足後の協会運営は、約10年間東大物性研・永野研究室の事務局と日大・安河内研究室の会誌編集局を中心に、永野先生と故安河内先生のご努力の上に成り立っていたと言える。協会が現在のようにシステムティックに運営されるようになったのは、後述する冷凍部会の発足以後である。それまで協会の審議・決定機関としては理事会が唯一のものであったが、常務委員会（現在、運営委員会に名前が変わった）が設立され、そこで立案・審議された案が理事会で決定されるという現在の形ができあがった。

このための準備作業は、冷凍部会の役員諸氏の手をお借りしたが、特に信貴先生、秋山好胤氏（元協会副会長、電総研、前川製作所）のお2人のご尽力が大きかったことを特記しておかねばならない。この委員会により協会の運営が集団で行われるようになったと同時に、運営に必要な諸規定類が整備された。これ以後、高温超電導の発見などもあって協会は益々発展の一途を辿るが、この辺の詳細については「低温工学」の協会創立20周年及び25周年¹⁵⁾の記念特集号を参照されたい。その後の活動については皆様も良くご存知のことと思うのでここでは割愛する。

4.2 冷凍部会の発足

冷凍部会の発足は昭和47年（1972年）である。低温工学研究発表会の特別講演で故明石克寛氏（当時、三菱電機）が冷凍関係の研究会の設立を提案されたのを受けて、日大の故安河内先生が冷凍部会というのを作りませんかと筆者に内々で指示された。発足当時の役員は、部会長・信貴先生、庶務幹事に筆者、委員に故安河内先生、故明石克寛氏、米満博夫氏（元東芝、鈴木商館）、菊地一成氏（元住友重機）、事務局に石塚素義氏（元ジェック社・社長、当時日大）である。この部会はその後の協会活動の中核になっていく。第1回の例会は、昭和47年（1972年）11月9日、第10回低温工学研究発表会の最終日に開催され、法人会員として民間企業21社、参加者約40名（法人企業から

は複数名の参加が可）を数えた。会は出席された東大・故大島先生、国鉄・京谷好泰氏（当時、副技師長）の「期待の辞」を中心に盛況の内に第一歩が踏み出されたが、部会の方向付けとしては三菱電機の明石克寛氏によって暗示された基礎研究と応用技術の結びつきによる工業化研究の促進がこれからの低温工学の支えに成るだろうということで衆目が一致した。趣意書に明記された部会の活動目標は、i) 将来の展望と方向付け、ii) 中堅技術者の交流、iii) 若手の教育と層の拡大の3つである。初年度は11月発足のため例会として3度しか開催されなかったが、2年目の昭和48年（1973年）には予定通り8回の例会を開催した。特に第2回例会（通算5回目）は仙台で開かれた第11回低温工学研究発表会に合わせて、「日本の低温・冷凍技術の今後」というパネルディスカッションが開かれた。座長に信貴先生、司会に筆者、パネラーに信貴豊一郎、筆者、田代為喜（日酸）、秋山好胤（電総研）、有馬一堯（国鉄）、守屋潤一郎（日本電子）、菊地一成（住友重機）、故小野寺大（東北大・通研）、という顔ぶれが揃い、米満博夫氏（東芝）、故神田先生（東北大・金研所長）、京谷好泰氏（国鉄・副技師長）等の発言を交えて大パネルディスカッション¹⁶⁾になった（カッコ内は当時の所属）。第5回には国際会議報告会と称して第19回CECの論文を数件紹介している。例会以外にも協会活動のサポートをいろいろこなした。7月には米GE社のフレミング博士の講演会、8月には京都・関西セミナーハウスにおいて3日間にわたる「低温工学の基礎と展望」と題するサマースクールを開催した。後者の講師陣には故安河内先生、故山本純也先生（当時、阪大）、堀内健文氏（神鋼）、荻野治氏（三菱電機）、秋山好胤氏、松原洋一先生、筆者、米満博夫氏、信貴先生という豪華な顔触れを揃えた。10月には超臨界ヘリウム冷却部会（部会長・小林嶺夫先生）を吸収合併して名実共に冷却・冷凍の総合研究部会になった。会計的にも協会本部とは独立した運営を行い、協会の活動の中核を占めるようになる。発足当時はコーヒブレイクを行っていたが、飲助の信貴部会長が「同じ飲むならビールの方が良いですネ」と言い出され、まさか部会費をビール代に当てる訳にもいかないので200円/人のカンパを行うことにしたが、この習慣は現在も続いているようだ（但し、300円/人に値上げされている）。酒を飲みながら議論をするという研究会も珍しいが、これは会員同士が仲良くなる、議論が意外な方向に展開するという予

期せぬ効果を生んだようだ。部会長は初代の信貴先生以後、秋山好胤氏、小林嶺夫先生、米満博夫氏、筆者、荻野治氏、川手剛雄氏（神鋼）、我妻洸氏（電総研）と変わったが部会活動は27年後の現在も続けられており、法人会員として民間企業42、大学官公庁34、個人会員3、合計71を数えている。現在の部会活動も積極的に行われており、役員も協会の中堅クラスで占められているが、最近のことについては割愛する。

4.3 関西支部の発足

関西支部の発足は昭和49年（1974年）である。信貴先生とのコンビは冷凍部会の運営でほぼ定型化していたが、ある時突然信貴先生が「関西支部は奥田毅先生（元岡山理大・学長）が作られたのだが、実体が伴っていない。本格的に活動を始めようにはしませんか」と言い出され、「今、関西でやる気があってエネルギーギッシュなのは阪大の山本先生、神鋼の堀内さん、三菱の荻野さんの3人なので、この3人を加えて少数精鋭でいきましょう」と提案された。その後このメンバーに何人かが加わったが、基本的にはこのメンバーが10年間役員を続け、現在の関西支部の基礎を作り上げたことから見ても、信貴先生の人を見る目の正しさがうかがえる。第1回の発足総会は大阪ガスの泉北LNG工場の見学会を合わせて行われ、参加者31名、委任状39名で正式に発足した。なにしろ支部としては会計0円での出発になり、他人のフンドシを利用して経費ゼロでスタートを切ろうとした訳である。この「金がない」というのは、これ以後の関西支部の運営方針の基盤になり、現在まで引き継がれている。事務局は阪大の低温センターに置かれ、現在も継続されているが、発足から10年間庶務幹事を務められた故山

本純也先生の功績は大きい。阪大・低温センターへの中元・歳暮をすべて断り、年会費1万円の維持会員制度を設けて関西支部の財政基盤を作るなど、故山本先生の業績は枚挙にいとまがないほどであり、発足当時の関西支部は信貴先生と故山本先生の求心力で維持されていたと言っても過言ではない。その後、支部長は故平井章先生（元京大）、岡田東一先生（協会副会長、福井工大、元阪大産研所長）、荻野治氏（三菱電機）、児玉隆夫先生（現大阪市立大・学長）と変わったが、その精神構造は発足当時のまま引き継がれている。この間の関西支部の活動は、第5回国際低温工学会議（ICEC 5、京都）の開催、サマースクールの開催、協会誌特集号（水素特集）の編集、低温工学ハンドブックの翻訳・出版や安全委員会への協力など数えればキリがないが、特筆すべき事項として神戸で開催された第9回国際低温工学会議（ICEC 9）が挙げられる。

4.4 第9回国際低温工学会議（ICEC 9）

ICEC 9の開催は、関西支部の存在を内外に示す大きなイベントになった。当初、実行委員会は故安河内先生、展示委員会は信貴先生を委員長に仰いで活動を始めたが、展示会の段取りをほぼ終わった時点で安河内先生が病を得られて入院、急遽信貴先生と筆者が実行委員会を担当することになり、展示会を故山本先生に引き継いだ。とにかく限られた時間内でやるべきことが山ほどあり、プログラム委と外国との対応業務（これについては永野先生、日大の小笠原武先生、小林久恭先生が大変な苦勞をされた）を除いて関西支部のスタッフはフル稼働に追い込まれた。会場担当・岡田東一、エクスカージョンとパンケット担当・堀内健文、展示会担当・故山本純也、時間的制約は勿論のこと予算が少ないから値切りまくれというのが合言葉に

Fig. 9 Starting meeting of Kansai-Branch of CAJ (at Osaka Gase-Senboku LNG Factory).

Fig. 10 Opening ceremony of ICEC-9.

なった。神戸のポートアイランドに国際会議場ができるらしいという情報を提供したのが神戸商船大の佐治吉郎先生、それにしようと思われたのが故安河内先生、ところが借用の申込みをしたときはまだ建設途中で、申込みは神戸市役所の振興課へという有り様、とにかくこの国際会議場の最初の国際会議がICEC 9ということで、本部の統轄作業は困難をきわめた。しかし会議は大成功、特に展示会は当初の倍以上の申込みがあり、73 コマが売れて大盛況。当時の日本の極低温・超電導を代表する旧国鉄の磁気浮上列車、原研の核融合、NASDA のロケット・エンジン、神戸商船大の電磁推進船などが出展され、低温・超電導の出版物コーナーも作られた。注目を浴びたのは、関西支部の海外低温工学研究会で進められていた「低温工学ハンドブック」¹⁷⁾の出版のメドがつき、出版物コーナーで現物展示（未完成の参考品）及びパンフレットが置かれたことである（3 カ月後に出版された）。とにかく会議も展示会も大成功、予算面でも値切り攻勢の成果があつて赤字を避けることができたが、この間のエピソードは限りなくある。パンケットに使用したサンフラワー号の借り賃を徹頭徹尾値切り、関西汽船をして「これ以上安くすると、会社が倒産します」と言わしめたり、灘五郷の酒造会社を渡り歩いて大吟醸酒をたらふく試飲したあげく、菰かぶり小さな升を数百個寄附させたり（これは主として信貴先生と堀内氏の仕事であつた）、枚挙にいとまがない。

外国からの参加者をして次の会議を引き受ける国がなくなるのではと言わしめたこのICEC 9は、関西支部の実力と結束力をいかに発揮した最大のイベン

トであつた。

この会議の後しばらくして安河内先生が亡くなられたのは痛恨の極みである。この辺のいきさつは低温工学の特集号^{18,19)}を参照されたい。

4.5 現在までの足どり

安河内先生が亡くなられた後、平成元年に大島恵一会長が亡くなられた。低温工学協会としては2本の巨きな柱を失ったわけである。しかし、高温超電導の出現で会員数が増え、東北・北海道支部ができ、学会の中に各種の研究会や委員会ができ、協会全体としてシステマティックに機能するようになってきた。歴史は歴史として、これからは中堅、若手の方々に大いに活躍してもらい、21世紀に存在感のある協会・学会になればと期待している。

5. 将来への提言

日本における極低温・超電導の発展の歴史を考える時、ビッグプロジェクトが大きな支えになってきたことは万人が認めるところであろう。MHD 発電、リニアモーターカー、トリスタン計画、超電導発電機、ヘリカル核融合、Super-GM 等々である。それにもかかわらずオネネスが超電導を発見してもう90年になろうとしているが、産業革命における蒸気機関にも匹敵するこの大発見が、MRIを含めてもまだまだ工業的レベルに達していない。一方、小型冷凍機は政府の金などほとんど出ていないにもかかわらず、半導体工業の勃興にタイミングを合わせて、今や世界で10万台以上が稼動しているといわれている。超電導が何故実用化に至らないのか、21世紀を目前にして真剣に

考えるべき時期が来ているのではないかと考える。

5.1 超電導めかけ論

昭和48年春、仙台で開催された低温工学研究発表会に合わせて、冷凍部会の主催で「日本の低温・冷凍技術の今後」—ICEC5をひかえて—というパネルディスカッション¹⁶⁾が開かれ、席上筆者が「低温めかけ論」を述べたが、これがその後かなり物議をかもした。今あえて超電導めかけ論を提起するのは、このままだと超電導が暗闇の中に落ち込んで仕舞うのではないかと危惧するからである。超電導が実用的レベルに達しない理由として3つのことが挙げられる。まず第一に、オンネス先生を含めると7人の人達がノーベル物理学賞を受賞している、超電導をいつまでも学問と考えていては実用化への道は遠のく一方である。第二に、液体ヘリウムという高価で、扱い難く、いずれ枯渇する化石資源に頼っている限り実用化の道は遠い。第三に、ビッグプロジェクト等という片車輪に頼っていると、同じ所をグルグル回っているだけで少しも前へ進まない。自前の費用で数が出るような用途開発をもう一方の車輪にして、二輪で前へ進む工夫が必要である。何かに使ってもらってこそその低温であり、何かに使ってもらってこそその超電導である。立場は同じと考えてよい。現実を見てみるに、そんなに不安材料ばかりではない。現実には液体ヘリウムを必要としない10テスラ以上の超電導磁石が商品化されつつある。それと高温超電導の実用化にもっと本腰を入れるべきではないだろうか。筆者の私見ではあるが、学問分野を除いて将来の超電導応用は高温超電導につきるような気がする。すなわちエレクトロニクス応用は液体窒素冷却、エネルギー応用は液体水素冷却、共に小型冷凍機を用いた再凝縮システムを内蔵したクローズドシステムを採用する。米国政府が金を出しデトロイト市がやろうとしている実用規模の液体窒素冷却による高温超電導送電のプロジェクトについて、米国政府は次のように言っている。「成功すれば民間に技術移転する、失敗すれば今後同様の研究に対して政府は金を出さない」と。正に背水の陣の研究である。高温超電導もこの2～3年の内に実用化の結論を出さなければ行き詰まってしまうのではないだろうか。超電導が行き詰まれば極低温も行き詰まってしまう。頑張ってもらいたいものである。

5.2 技術の伝承

かつて料理人の世界は徒弟制度が基本であり、料理人に成ろうとすると何処かの料理屋に住み込み、親方

の技を盗むというのが普通であった。辻静雄が辻調理専門学校²⁰⁾というのを設立した。料理の技術を学校で教えるわけである。これは画期的なことであった。極低温・超電導の世界で、若者に伝えられる標準化技術としては小型冷凍機しかない。標準化された技術があればこそ、新しい蓄冷材の開発が意味を持って来たのである。しかし、超電導を志す若者達は現状ではまるで徒弟制度のような技術の修得を強いられているように見える。教則本としてはハンドブックがある。内田老鶴圃から出版された「低温工学ハンドブック」¹⁷⁾は独物理学会のセミナー用予稿で、信貴豊一郎先生、故平井章先生、岡田東一先生と関西支部の若手のご努力で刊行され、若い人達の勉強に大いに役に立った。

オーム社から刊行された「超伝導・低温工学ハンドブック」²¹⁾は低温工学協会発足25周年を記念して、信貴先生、相山義道氏を中心に国内百数十人の極低温・超電導の科学者達が一から筆を起こして書きまとめた集大成であり、知識の伝承という点では大きな役割を果たすにちがいない。手で、皮膚で学習する講習会が関西支部、冷凍部会で企画実施され、若手教育に大きな実績を挙げつつある。しかしこれだけではまだ足りない。超電導機器として工業的規模で標準化されたものが何か一つ欲しい。

新しい発展は、誰れでもが知りえる知識・技術の上に成り立つと考えるなら、超電導研究に従事しておられる中堅の方々に、超電導めかけ論を噛み締めて、さらなるご努力をお願いしておきたい。

古い話が多く、記憶の定かでないことも多々あったが、信貴豊一郎先生、秋山好胤氏をはじめとして多くの先輩、諸兄から訂正やコメントを頂いた。紙面を借りて厚く御礼を申し上げる。

参 考 文 献

- 1) 武藤芳雄：低温研究発祥の地・仙台，低温工学 **33**, No. 6 (1998) 354
- 2) 渡辺 昂：日本における低温物理の黎明期，低温工学 **34**, No. 1 (1999) 2
- 3) 信貴豊一郎：私の低温事始めと低温工学見聞録，低温工学 **34**, No. 10 (1999) 498
- 4) 柳井正誼：我が低温人生，関西支部発足20周年記念特集号 (1993) 59
- 5) 柳井正誼ら：クライオポンプの研究，真空 **10**, No. 2 (1967) 63
- 6) 柳井正誼ら：Au(Fe)合金を用いた極低温用熱電対，低温工学 **9**, No. 2 (1974) 78
- 7) Jacob: Heat Transfer I, II, John Wiley &

- Sons 社 (1949)
- 8) 柳井正誼：W.E. Gifford の死を悼む，低温工学 **15**, No. 4 (1980) 31
 - 9) 柳井正誼ら：4.5 K 小型冷凍機の試作，低温工学 **5**, No. 4 (1970) 199
 - 10) 柳井正誼ら：加速器冷中性子源と冷却システム，低温工学 **20**, No. 2 (1985) 63
 - 11) 柳井正誼：極低温小型冷凍機，超低温技術 '72, 9月号 (1972) 79
 - 12) 柳井正誼：パルス・チューブ冷凍機，低温工学 **3**, No. 5 (1968) 201
 - 13) 柳井正誼：パルス管冷凍機，ISTEC ジャーナル **9**, No. 3 (1996) 18
 - 14) 低温工学，20 周年記念特集号 **21** 別冊 (1986)
 - 15) 低温工学，25 周年記念特集号 **26** 別冊 (1991)
 - 16) パネルディスカッション，低温工学 **8**, No. 3 (1973) 109
 - 17) 低温工学協会関西支部編・海外低温工学研究会訳：低温工学ハンドブック，内田老鶴圃新社 (1982)
 - 18) 低温工学，ICEC 9 特集号 **17**, No. 4 (1982)
 - 19) 低温工学，ICEC 9-ICMC 展示会特集号 **17** 別冊 (1982)
 - 20) 海老沢泰久：美味礼讃，文芸春秋社 (1992)
 - 21) 低温工学協会編：超伝導・低温工学ハンドブック，オーム社 (1993)