低温センター その機能と構成

“Cryogenic Centens-their Taskr and their Organization”

G. KLIPPING

Fritz-Haber-Institut der
Max-Planck-Gesellschaft,
Berlin-Dahlem.

1955年頃まで、低温物理の研究はほんの数える程の特別な研究所で行なわれていた。その後の数年の間に研究領域を低温まで広げようとする他の分野で活動している研究所の数が増え、窒素、水素、ヘリウムの液化がはじまった。このような進展とともに、低温実験室に必要な設備、のぞましい構成を扱った論文が、数編50年代に発表された。(1-7) 10年後には、あちこちの低温実験室の研究について一連の論文が現われ、ここでは、単に物理的研究に関するものだけに限らず、低温技術の開発と物理の他の分野の科学者らとの協力に関した、かなり特殊な実験室の役割について語られている。(8-10)その後低温は研究用実験室の色々な部門だけでなく、しばし新しい通信技術、電気技術、真空工学等の大きな技術プロジェクトにも巾広く応用されるようになった。最も興味ある未来への応用の一つとして、高速地上輸送が上げられている。したがって低温技術一すなわち、低温物理の応用一は少くとも低温物理と同じレベルの重要な分野となってきた。(12)それにともなって低温実験室に向けられる要求も変わってきており、将来の発展のためにその構成と役割を一度議論しておくことが有効であると思われる。

1. 低温技術の分野

現在の低温技術のスケールの大きさは、日本の低温工学協会の第5回総会で K. Oshima らによって議論された“低温の木”によって、明確に示されている。(13) Fig. 1. この木の根は低温技術の基礎であり、枝のある幹はその種々の応用を表わしている。低温技術は急速に発展した分野であるので、低温の木は依然その成長を続けている。多くの枝と異なり、低温工学は冷却、温度の測定や制御、熱の伝達と輸送、絶縁等がすべての応用の枝と同様にそれ自身完全な分野となっ

ている。

このようないろいろな分野で、実りある発展をするためには、異なる応用の枝との間の交流と同様に、基礎的科学や工学分野にまでわたる広範囲な交流を必要としている。このことは、日本で1952年頃に実現された大学の低温センターや他の大きな研究所の設立によってはっきり確証される。(9) ベルリンでは、各分野または研究所の興味ある科学者間の協力は、1957年 Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft にはじめてヘリウム液化器を設置した時の長であった M. V. Laue によってはじめられた。彼のこの提案によって Max-Planck-Gesellschaft 研究所とベルリンの大学との間ばかりでなく、ドイツ国内の地方の科学者等との間にも、巾広い、実りのあるアイデアや知識の交換が行なわれることになった。そして、現在低温センターはベルリンに設立されていないけれども、協力関係についての最初の提案をうけて、自然発生的に生じた組織が多く の点でセンター研究所にあたる役をしている。同様な発展は他のところでも起っている。

以下に紹介する低温センターの構成と機能についての考えは、過去11年間のベルリンでの経験に基づいており、多くの他の研究所との間に行なわれた、このトピックについての有益な議論によって巾のあるものとなっている。

2. 低温センターの機能と設備

低温センターの巾の広い機能には、新しい冷却方法の開発、低温液体の供給、研究開発プロジェクトの共同作業、実験技術の指導等が含まれている。低温センターとして良い仕事を行なうための必要条件として、高度の技術的水準とともに、最小規模というものがあることをここで指摘しておかなければならない。

Fig. 1 The cryogenic tree.
(With friendly permission of the authors
M. Kobayashi and K. Oshima /13/).

3. ガスの液化と分配

低温センターは、研究所で必要なすべての低温液体を供給する。このことから、低温液体の急増しつつある需要について重要な経済的側面を考えることができる。

液体窒素は、今日では工業用として多方面に用いられている。そのため、商業ベースで生産され、かなり低価格で会社から市販されている。その結果、しばしば窒素の液化器を運転するより低温センターには、大型貯蔵タンクを置き、会社から液化ガスを購入する方がずっと経済的となる。これにより、液体窒素の値段を下げ、さらにセンターの電力と水の使用量をかなり少なくするという利点が得られる。

しかしながら、液体の購入は単に問題の一部である。実験室内での分配系や取扱い方法は、最善となるよう注意を払わねばならない。

大型貯蔵タンクでは、液体窒素は大抵、約2気圧に保たれている。このタンクからくみ出す場合に幾つかの問題が生ずる。このような場合、タンクに中型の仲介用貯蔵容器を接続しておき、ここを仲介にして小型運搬用デューワーにくみこむ方法が賢明であろう。Fig. 2 液体のトランスファーには、が自己呼吸式遠心ポンプが有効である、現在、市場に余り現われていない。時には、建物の各部屋に液体窒素分配用の真空絶縁した長距離トランスファー系を設けることが便利である。

実験室での液体窒素の取扱い方法は十分に開発されていないことが多い。自動補給装置(14-17)について提案がいろいろされている割には、余り広くは使われていない。多くの場合に自動補給装置は冷媒と同様、高価な労力の節約になるし、実験をより安全なものとするのに有効であることをよく考慮すべきである。同様の問題は、トランスファースチューブや他の器具を使用する場合にも現われる。液体窒素を完全に使いこなすには、低温センターが何らかの努力をしなければならない。

液体窒素は、特殊目的以外には、ほとんど使用され

Fig. 2 Discharging of liquid nitrogen from a large storage tank ($p \sim 2$ atm).

ていなので、液体ヘリウムが液体窒素に次いで実験室で最も重要な冷媒となっている。

最新式のヘリウム液化器は、高度に発展しており、自動ガス純化装置が含まれ、ほとんどのものが最小の保守で連続運転が可能となっている。液体は大型貯蔵容器に集められ、そこから小型運搬用デュワーに供給される。

はじめの頃には、必要な仕事の大部分は、ガスの液化と液化器の保守に当てられていたが、液化器の改良が進むにつれて、ガスの純化が運転者の多くの時間を費やすようになった。扱う液体の量が非常に増えた現在では、自動自己純化液化器での、主な労力は運搬用デュワーへのくみこみへと移っている。このことから近い将来において、運搬用デュワーに必要な昇降動作をさせるために、潜望鏡式のトランスファーチューブを含み、信頼性があり、操作の容易な半自動ヘリウム用トランスファーチューブの開発へと活動の方向が向かうことをはっきり示している。

必要な労力についてのべたついでに、もう一つのことと触れておくべきであろう。経験から、液化プラントは一人の技術員によって運転、保守されるのではなく、その責任が少なくとも、一人の物理屋、一人の技師と1ないし2名の技術員から成るチームに分かれている場合にのみ最もうまくいっている。

物理屋は、実験プロジェクトからの要請で急な備品や技術的水準の変更をする為に、プラントや実験室のあらゆる他の技術的装置の改造には、同等の資格をもっている。この活動には、彼等の時間の僅かを割くだけで、主な時間は研究や開発、教育その他に回ることができる。技師は運転やプラントの保守を監督する。彼はその能力の一部を必要とする、システムの必要な改造についての技術的検討を行なう。さらにガスや液体の組織的な分配、予備品や付属装置の購入、貯蔵に責任を持つべきである。まとめて集中保管しておく方が経済的なのでステンレスチューブ、バルブ、ペロー、備品、温度素子、蒸気圧温度計用純化ガス等の充分なストックを、センターとして用意しておくべきである。技術員は、プラントを運転し、デュワーを満たし、技師とともに保守を行なう。

センターで働いている技術陣と、科学者間の良い協力関係をえ、理解し合い、センターの効率を上げるには技術陣のメンバー全員が、その余裕の時間を実験的仕事にまわって当ることがよい。これを可能にし、プラントの分解や修理または冷媒の消費ピーク時に必

要な労力を確保しておくには、技術陣は少なすぎても良くない。このことは研究プロジェクトにとっても大きな利点である。技術陣の全員が、プラントや他の技術装置の運転に必要な仕事をこなせることは、勿論重要なことである。

液体ヘリウムの分配用に色々なサイズ（10～250l）の運搬用デュワーを利用できる。一つの場合に種々の型の異なるデュワーを用いるのは得策でないので、センターとして研究所内のどこでも使用できる、規定の運搬用デュワーを決めておくべきである。ほとんどの所で、2種類のサイズ—小型の25l用と大型の100l用—の運搬用デュワーが必要である。同じ型のすべてのデュワーは同じ高さで、接続部はどのデュワーにも容易に交換できるよう規格化しておくのがよい。

トランスファーチューブ、クライオスタート、クライオスタートのふた、温度—圧力制御バルブやユニット等のような実験装置の構成部品についても、出来るだけセンターから規格化の指導をすることがのぞましい。これにより、必要に応じて部品の交換、接続が可能になる利点が得られる。

最新式の実験技術—液体ヘリウム自動補給または連続式流入クライオスタートシステムを用いる長期間の実験—には、実験セットに運搬用デュワーが内蔵されていることが必要となっていることを、強調しておかなければならない。つまり、研究者が実験に必要な間、運搬用デュワーを置いておく必要があることを意味している。実験用デュワーに、ヘリウムを入れるためにサブセンターをつくることはすすめられない。

4. 冷却技術の開発

今日では、低温は熟練した専門家だけでなく、低温技術に経験のない研究者にも広く使われるようになっている。他方、実験、応用両面から絶えまない技術的水準のレベルアップ—任意温度の調節可能、高い温度安定性、温度プログラムの実施、長時間運転、大型実験セット内の難しい条件下での部品や試料の冷却、大量または時間変化をする熱負荷の補償等—の要求が出されている。これらの要求を満たすには、冷却技術の開発の際に、総合的に仕事を進めねばならない。さらにこのような開発には、研究者等に新しい実験的な試みを行なう機会を与える必要がある。

これらのことを、種々のプロジェクトに含めることが可能であるため、低温センターでの開発は良い結果を生むことができる。低温センターの研究者や技師等

のチームは将来の問題についての解答を用意するためにも、多くのプロジェクトから得られる経験—知識を

Fig. 3 Continuous flow cryostat connected to transport dewar and vacuum pump /26-28/.

a) connection to transport dewar; b) support; c) cooling head; d) sample; e) control valve (vapour pressure controlled or electrically controlled); f) pressure gauge; g) to helium recovery system; h) vacuum pump; i) to helium recovery system; k) transfer tube; l) radiation shield.

Fig. 4 Cooling finger for field ion microscope /29/.

a) connection to transport dewar; b) cooling finger; c) field ion ion microscope; d) control valve; e) vapour pressure thermometer; f) pressure gauge; g) vacuum pump; h) hydrogen filling line; i) evacuation; k) to helium recovery system

Fig. 5 Continuous flow cryostat for neutron scattering experiments with controlled gas flow through the sample container /30/.

1) cooling head; 2) radiation shield; 3) vacuum housing; 4) carrying tube=inlet for the transfer tube; 5) vacuum jacketed transfer tube; 6) vent gas line in contact with radiation shield; 7) connection to control valve and recovery system; 8) bulb of vapour pressure thermometer; 9) capillary tube; 10) electrical temperature sensors; 11) sample container; 12) narrow connection tube between cooling head and sample container; 13) sintered metal plug; 14) vent gas bypass line; 15) needle valve.

利用できるように、それらを蒐集できるようにしておくべきである。実験的な低温技術の開発は、それ自身の目的のためだけにすべきでなく、進歩しつつある実験と関連して行なわれなければならない。

他方、センターのスタッフは自身の研究的仕事をやる機会がなければいけない。種々の冷却の問題を解く際に特別なプロジェクトだけに高い関心があるのではなく、技術的側面でさらに進歩するために研究を必要とする、より基本的な性質についての疑問が生じてこよう。

過去 10 年間、冷却技術の急速な発展は、一例とし

て1~300Kの温度領域により、簡単に示すことができる。しばらくの間、低温物理の主な仕事は良く知られているデュワークライオスタットの中でのみ行なわれてきた。デュワーの中を減圧して 4.2-1.2K に温度を下げることは容易なので、種々の方法が、圧力即ち温度を一定に保つために開発された。(18-20) ヘリウム浴クライオスタット中では 4.2K 以上の温度を調節することが難しい機能なので、提案されている幾つかの解決法も、冷媒の消耗、温度の安定度、運転時間等の点で、われわれの意を満たしていない。(21-25)

しかしながら、多くの実験には、ヘリウム温度と300

Fig. 6 Low temperature monocrystal-goniometer (a) and details of the sample holder (b) /31/.

- a) 1) sample holder; 2) vacuum jacket; 3) cooling head; 4) indium seal; 5) evacuated space; 6) sample chamber; 7) coolant distribution channel; 8) heat exchanger; 9, 10, 11) vent gas cooled radiation shield; 12) stainless steel pin; 13) basic flange; 14) stainless steel pin; 15) vacuum casing; 16) inlet tube for temperature sensor; 17) temperature sensor; 18) connection tube for temperature sensor; 19, 20, 21) temperature sensors; 22) mounting plug; 23, 24) mylar windows;
- b) 1) sample mount; 2) toothed rim; 3) worm drive; 4, 5) copper rings; 6) lead mask; 7) sample; 8) mounting plug (22 in fig. 6a).

Kの全温度領域をおおうことが、関心の高い問題であり、これが、連続流入クライオスタットの開発を導いた。(26-28) Fig. 3はこの型のクライオスタットの一例を示している。真空ポンプ(h)によって、液体ヘリウムはトランスファーチューブ(k)を通して引かれ、クライオスタットの冷却ヘッド(c)に入り、蒸発し、所定の温度に冷却する。生じた冷たいガスは、ラディエーションシールド(l)を冷やし、コントロールバルブ(e)をへて、回収系(g)へとポンプで引かれる。温度のコントロールは、蒸気圧または電気的コントロールバルブによって行なわれる。

いろいろな方面への応用ができるように、3図に見られるように、クライオスタットは運搬用デューワの頭部に直接据えつけることができる。他の場合には、冷却系はいくらか大きい装置の中に組込まれており、L型またはU型ないしフレキシブルタイプの長いトランスファーチューブによって運搬用デューワーに接続されている。

連続流入クライオスタット系は、連続運転のとき、安定して 2.5Kと 300Kの間の任意の温度を調節できるだけでなく、その他にも幾つかの利点を具えている。冷却能力(蒸発の潜熱やガスのエンタルピー)が充分生かされ、他の冷媒が必要でない。大抵の場合が冷却すべき量は小さい。実験の中止または終了のときの液体損失がない。このようにこの型のクライオスタットの運転は、非常に経済的である。クライオスタットの中に液浴がないので任意の向きに据えつけることができる。この設計には、ほとんどどんな要求にも適応が可能である。

いろいろに設計された連続流入クライオスタットが、その応用分野でうまく作動している。イオン顕微鏡(Fig. 4/29)、中性子散乱の実験(Fig. 5/30)、X線カメラ(Fig. 6, 7, 8/31)、クライオポンプ(Fig. 9, 10/27, 28, 32, 33)、メスパワー実験(Fig. 11/34)、超伝導マグネットの冷却(Fig. 12/35)、電子顕微鏡(Fig. 13/36)。コントロールバルブを改良すると、到達可能な温度安定度は $\Delta T/T \approx 10^{-5}$ まで上げることが可能となっている。(36-38)

しかし、上のように述べたからと言って、連続流入クライオスタットがデューワクライオスタットのほとんどにとって代わる、と結論することは誤りである。依然、ガラスまたは金属製のデューワクライオスタットが多く使用されている。特に、金属製デューワクライオスタットはここ数年の間に高い水準に発展してい

Fig. 7 Low temperature Debye-Scherrer camera /31/.

- 1) cooling head; 2, 3) sintered metal plates; 4) sample chamber; 5) sample; 6) cylindrical mylar window; 7) collimator; 8) mylar window; 9) aluminum cap; 10) superinsulation; 11) radiation shield; 12) coolant supply tube; 13) radiation shield; 14) needle bearing; 15) ball bearing; 16) retaining rings; 17) driving shaft; 18) movable plate; 19) spring; 20) rigid support; 21) adjusting screw; 22, 23) temperature sensors.

Fig. 8 Low temperature Guinier-camera (a) and details of the cooled sample holder (b) /31/.

- a) 1) support; 2) Guinier-camera; 3) X-ray tube; 4) monochromator; 5) base plate; 6) vacuum casing; 7) casing of the X-ray tube; 8) cooling water supply; 9) sample holder; 10, 11, 12) other possible positions of the sample holder; 13) motor; 14) coolant supply line; 15) vent gas line;
- b) 1) sample mount; 2) sample (fixed between Hostaphan foils); 3) cooling head; 4) coolant inlet (flow channel); 5) coolant outlet; 6) radiation shield; 7) vent gas tube; 8) rectangular stainless steel tube; 9) stainless steel pins; 10) stainless steel plate; 11, 12, 13, 14) teflon knife-edge bearings; 15) camera casing.

る。蒸発損失の少ない広口のクライオスタットが現在利用されている。(39) それらの多くのものは、交換可能な部品が用いられており、どんな応用にも適応できるよう作られている。これらの開発は、超伝導マグネット冷却用という需要によって、強く奨められている。

デュワークライオスタットでも、長時間運転や熱負荷の大きい実験を可能にするには、自動ヘリウム補給装置を開発しなければならない。(40-46) 今では、クライオスタットの中の液面を 4.2K と 1.2K の温度領域で一定に保つことができる。

常圧の液体ヘリウムの補給装置が Fig. 14 に示されている。(42-43) クライオスタットは、トランスファーチューブ(7)を通じて、運搬用デュワー(1)に接続

している。トランスファーチューブの液体の通るパイプは、排ガスによって冷却されているラディエーションシールドにより囲まれている。トランスファーチューブの出口には、焼結金属のキャップに囲まれた膨張弁(9)がついている。液体ヘリウムを移送するのに必要な過圧は、運搬用デュワーの排ガスライン(4)のオーバーフローバルブ(3) ($dp=20-100$ Torr)を調節してえられる。コントロールユニット(6)のブリッジ回路の一部となっている液面素子(10) (カーボン抵抗)によって膨張弁はコントロールされる。もし運搬用デュワーの蒸発速度が必要な過圧を保つに不足場合にはコンタクトマンオメーター(12)によってコントロールされるヒーター(13)を用いて、蒸発を増すことができる。

Fig. 9 Cryopump for experimental purposes (cold surface of definite area)/32, 33/.

- a) cold condenser plate; b) vent gas tube; c) radiation shield; d) warm shield (room temperature); e) base flange; f) coolant supply tube; g) temperature sensors (bulbs of vapour pressure thermometers).

Fig. 15 a, b は、ラディエーションシールドされたトランスファーチューブと膨張弁の断面とを図的に示してある。(27, 42, 43) 排ガス管 (2) は真空ジャケット (1) を通り、ラディエーションシールド (3) と熱接触しているのが見られる。バルブシートへの熱流入を出来るだけ小さく保つよう、バルブ用の軸 (6) は排ガス管の内側に取付けられている。焼結金属キャップにより Fig. 15C に示されるように、有効な相分離がえられる。

4.2K と 2.18K (入点) の間の一定温度を保つために、上記と同様の部品を利用することが出来る。Fig. 16のように、幾つかの部品を加えるだけですむ。(42, 43) 排ガスラインは、真空ポンプ (1)、圧力交換器 (7)、増巾器 (5)、コントロールバルブ (4) から構成される圧力コントロール系に接続している。熱負荷が大きいときには、トランスファーチューブの排ガス管の回収能力では、蒸発ガスすべてを回収出来ないことがある。このような場合には、クライオスタットのふたに、もう一本よけいに排ガスラインを接続しておかねばならない。安定度の高い温度をうるには、圧力コ

Fig. 10 Cryopump with two condensers at different temperatures: inner condenser plate 2.5 K, surrounding cylindrical condenser 18 K. Measured values of the pumping speed for a cryopump with an inner condenser plate of 75 mm diameter and a cylindrical condenser of 98 mm diameter and 100 mm height: N_2 5,000 l/s and H_2 2,500 l/s /27, 28/.

- a) base flange; b) coupling for vacuum jacketed transfer tube; c) inner condenser plate; d) temperature sensor; e) centering piece; f) outer cylindrical condenser (bifilar copper tube helix) cooled by vent gas from the inner condenser plate; g) vent gas cooled radiation shield; h) stainless steel pins; i) radiation shield; k) connection to control valve, vacuum pump and recovery system.

ントロール用の電動コントロールバルブ (36) と電気的圧力検出器を用いて行なわれる。

幾つかの付属部品をつけた同様の補給系を、超流動ヘリウム (2.18-1.2K) の補給にも応用することが出来る。(44, 45) Fig. 17 を見ると、クライオスタット

Fig. 11 Continuous flow cryostat for the cooling of source and absorber in a Mössbauer experiment /34/.

A) annular heat exchange chamber packed with sintered metal; B) radiation shield; C) transfer tube; D) annular chamber (vapour pressure thermometer); E) secondary thermometers; F) heater coil; G) beryllium window; H) indium ring; J) suspension wires (stainless steel); K, L) windows of radiation shield and vacuum chamber (aluminum or aluminized mylar foil); M) absorber; N) source; O) velocity drive; P) shaft (stainless steel tube); Q) bellows seal; R) heat conducting connection (flexible copper wires); S) beryllium window; T) second source for simultaneous control spectrum.

のふたについている挿入系によって、デューワーの中は2つの部屋(8, 16)に分かれているのがわかる。2ヶの液面素子(10, 13)と2台の真空ポンプ(V_1 , V_2)が必要である。He-II 浴(14)の温度は、ポンプ V_2 と圧力コントロール系(7, 5)によって一定に保たれる。He-

Fig. 12 Continuous flow cryostat for the cooling of superconducting magnets /28, 35/.

a) transport dewar; b) transfer tube; c) continuous flow cooled helix; d) vent gas cooled radiation shield; e) control valve; f) vacuum pump; g) control line; h) superconducting magnet; i) magnet container; k) inlet for helium gas (heat transfer medium-pre-cooled in counterflow heat exchange with the vent gas); l) automatic filling system; m) helium gas storage; n) superinsulation; o) vacuum casing; p) sample inlet; q) support.

II 浴が補給される場合には、液面系(13)によって、膨張弁が開けられ、He-I がいくつか部屋(8)に移される。液面系によって膨張弁が閉じられる。今、圧力即ち He-I 浴(11)の温度が真空ポンプ V_1 によって下げられる。そして温度が He-II 浴(14)の温度より少し

Fig. 13 Double circuit continuous flow cryostat for the cooling of sample (5–293K) and condensation shield (20 K) in an electron microscope : a) schematic drawing of the double cooling circuit, b) sample holder and condensation shield /36/.

- 1) sample holder; 2) condensation shield; 3) temperature sensors; 4) branching chamber; 5) vent gas cooled radiation shield for coolant inlet tube; 6) control units; 7) control valves; 8) vacuum pumps; 9) coolant inlet; 10) vent gas outlet; 11) radiation shield; 12) translation device; 13) heat exchanger (condensation shield) 14) space for tilting device; 15) heat exchanger (sample holder); 16) supportings; 17) base plate.

下がると、挿入系の底部のスーパーフィルター(12)が液体を通し、液体が下に流れ下部浴を再び満たす。このスーパーフィルターは He-I 用の温度コントロール弁として働き、He-I の補給中に避け難い圧力変化が、下部の部屋に伝わることを妨げている。この補給機構の詳細は、引用文献(46–48)に述べられている。He-I の補給のために、スーパーフィルターは、クールダウ

ンバルブ(15)によりバイパスされ、それに 1 枚のポンプ V_1 が当てられている。

これによって複雑な冷却の問題をも解決できる種々の連続流系とデューワークライオスタットの組合せたものを設計することが出来ると、容易に考えられる。すべてこれらの技術は、上記のように、実験セットの中に運搬デューワーを組込むことが、どの場合にも必要とされていることは明白である。経験によると、最近の実験技術は、確実に利点を具えている低温装置の改良に、研究者の活発な参加を促していると思える。

さらに、ヘリウム運搬用デューワーは、最もフレキシブルな冷源であることを指摘しておかなければならない。普通の実験目的だけでなく、近い将来、クローズドサイクル冷凍機と結びつけられ予定の冷却装置の開発の初段階用としても、便利に使用することもできる。

冷凍機、液化機の開発は主に会社によって行なわれているという事実はあるが、低温センターのスタッフは、これらの機械の最新の水準について、十分知らされているべきである。時には、この分野の開発への参加も可能であり、必要でさえあると思われる。

15年前における 4 K 近傍の温度と同様に、極低温は現在まで特殊な研究者だけの分野である。固体物理からの要請によって、 $\text{He}^3\text{-He}^4$ 希釈冷凍機の開発は非常に刺激された。しかしながら、あらゆる努力にも拘わらず、これらの冷凍機は、まだ高度なこじつけ的な点があり、研究者はその進展とともに、多くの特殊使用法を必要としている。その理由は、単に極低温へ到達することだけでなく、広範囲な温度のコントロールと測定、熱伝達の問題についての解等にある。必要な知識をえ、他の研究グループに知識を連絡することは低温センターのこれからの機能の一つであろう。

このことは、極低温のみならず、一般にすべてのコントロール、測定技術についても当てはまる。開発を進めるためには、研究者個人がゼロから出発している個人の経験を集めることを、意識的に避けるべきである。

低温の測定には、続けて改良されねばならない、種々の測定法が用いられている。(49) 温度コントロールと同様、測定法の開発のために、低温センターの幾人かのスタッフが、専門にこれに当たるべきであろう。大抵、2 次温度計(カーボン、ゲルマニウム、プラチナ抵抗、サーミスター等)が温度測定に用いられている。十分に検定されていない 2 次温度計用検定系は、一般用として低温センターに設けられるべきである。

Fig. 14 Automatic refilling device for normal boiling liquid helium /42, 43/.

1) transport dewar; 2) level sensor (carbon resistor) 3) overflow valve; 4) connection to helium recovery system; 5) vent gas tube inside transfer tube; 6) power supply and control unit; 7) vacuum jacketed transfer tube with vent gas cooled radiation shield; 8) cryostat; 9) expansion valve surrounded by sintered metal cap; 10) level sensor (carbon resistor); 11) liquid helium bath; 12) contact manometer; 13) heater.

Fig. 15 Cross-sections of the transfer tube with vent gas cooled radiation shield (a, b) and the expansion valve (a) and model for the mode of operation of the sintered metal cap (c) /27, 42, 43/.

1) vacuum jacket; 2) vent gas tube; 3) radiation shield; 4) liquid carrying tube; 5) guide tube; 6) valve stem; 7) end piece with valve seat; 8) valve plug; 9) sintered metal cap.

Fig. 16 Automatic refilling device for helium I at 4.2 to 2.18 K (λ -point)/42, 43/.

1) vacuum pump; 2) connection to helium recovery eyetem; 3) overflow valve; 4) control valve; 5) power supply and control unit for pressure control; 6) power supply and control unit for level control; 7) pressure transducer; 8) vacuum jacketed transfer tube with vent gas cooled radiation shield; 9) cryostat; 10) expansion valve with sintered metal cap; 11) level sensor (carbon resistor); 12) liquid helium bath; 13) transport dewar; 14) level sensor (carbon resistor); 15) heater; 16) contact manometer.

5. 他の活動

すべての低温の応用には、真空は欠くことのできないものである。したがって、低温センターで、真空技術は高い水準にあるべきである。いろいろな要求を満たすために、低温センターは幾台かの秀れた機械を具えた、センター個有のメカニカルワークショップをもつか、セントラルワークショップまたはそれに類似したものと同結していなければならない。

センターでの研究的な仕事の傍、低温技術、真空技術、低温での実験技術の教育と指導が必要である。指導の目的（他の研究所からの初心者、新しい実験装置のテスト等）には、センターはゲスト用に充分のスペースを必要とする。冷媒を多く使う実験は、センター即ち液化機から遠くない所で行なわれるべきである。

低温に関するデータ（冷媒や物質の性質）や文献の収集、評価は、低温センターでされるべきである。こ

の方面の主な仕事は、Boulder の US National Bureau of Standards (6) の低温データセンターによって行なわれ、他のセンターを大いに助けている。

6. 結 び

液体ヘリウムは今日、液体窒素と同じく、ほとんど一般的な冷媒となっている。低温センターは必要な装置や知識を整えることにより、研究や技術へ応用するために低温を必要とする誰にでも、役立つように援助を行なうべきである。センターとしての成功は、現在および将来の必要性について、はっきりした認識と可能な範囲内でならどこでも協力できる可能性と、協力しようという意志に大きく懸っている。

感 謝

上に述べたような、本論文に示された多くのアイデアは、今年の初め日本を訪問中に会った多くの日本の同僚との間で議論されたものである。この機会を借り

Fig. 17 Automatic refilling device for helium II at 2.18 to 1.2 K/44, 45/.

1) transport dewar; 2) vacuum jacketed transfer tube with vent gas cooled radiation shield; 3) connection to helium recovery system; 4) control valve; 5) power supply and control unit for pressure control; 6) power supply and control unit for level control; 7) pressure transducer; 8) upper chamber of the cryostat; 9) expansion valve surrounded by sintered metal cap; 10) level sensor (resistor); 11) refilling bath; 12) superfilter (acts as temperature controlled valve for He II); 13) level sensor (carbon resistor); 14) helium II bath; 15) cool-down valve (refilling of He I); 16) lower chamber of the cryostat; 17) bypass (refilling of He I); V_1, V_2 vacuum pumps.

て、そのときの親切なもてなしと関心に感謝し、日本における非常に教育的で、興味のつきない滞在について寛大な招待をして戴いた日本学術振興協会に感謝の意を表わしたい。

(訳 碓井信光)

参考文献

- 1) D. Shoenberg, Royal Society Mond Laboratory, Cambridge. Nature 171, 458, 1953.
- 2) N. S. Rasor, Simple Equipment and Techniques for a Small Cryogenics Laboratory. Rev. Sci. Instrum. 25, 311, 1954.
- 3) E. Mendoza, Liquid Helium in Britain. Organization and Purpose of the Liquid

Helium Pool.

Vacuum 4, 476, 1954.

- 4) P. Grassmann, Neues Tieftemperaturlaboratorium in den USA. Kältetechnik 6, 80, 1954.
- 5) M. L. Weil, Nouveaux équipements du laboratoire de basses températures de Grenoble. J. Phys. Radium 16, 25 s., 1955.
- 6) R. F. Broom, A. C. Rose-Innes, Simple equipment for a small low temperature laboratory. J. sci. Instrum. 33, 420, 1956.
- 7) P. Grassmann, Das Heliumlaboratorium der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich. Kältetechnik 8, 125, 1956.

- 8) C. J. Gorter, K. W. Faconis, The Kamerlingh Onnes Laboratory. *Cryogenics* 4, 345, 1964.
- 9) K. Oshima, Low Temperature Work in Japan. *Cryogenic* 5, 1, 1965.
- 10) B. W. Birmingham, Cryogenics at the National Bureau of Standards Boulder Laboratories. *Cryogenic* 5, 121, 1965.
- 11) O. Lounasmaa, Low temperature laboratory, Helsinki University of Technology. *Kyltek. Tidskr.* 4, 26, 1971.
- 12) K. Mendelssohn, The International Organization of Cryogenic Engineering. *Cryogenics* 11, 439, 1971.
- 13) M. Kobayashi, K. Oshima, University of Tokyo, private communication.
- 14) J. E. Sherwood, Automatic Liquid-Nitrogen Dispenser. *Rev. Sci. Instrum.* 23, 446, 1952.
- 15) K. H. Purser, J. R. Richards, Liquid air level controller for cold traps. *J. sci. Instrum.* 36, 335, 1959.
- 16) K. Thiele, Ein einfacher Faltenbalg-Füllstandsregler für tiefsiedende flüssige Gase. *Kältetechnik* 14, 288, 1962.
- 17) J. Bardin, A. Ropke, Liquid nitrogen level control with low-high regulation. *Cryogenics*, 12, 58, 1972.
- 18) I. Simon, A Helium Cryostat Temperature Control. *Rev. Sci. Instrum.* 20, 832, 1949.
- 19) H. S. Sommers, Two Types of Regulators and the Precision Control of Helium Bath Temperatures. *Rev. Sci. Instrum.* 25, 793, 1954.
- 20) M. M. Kreitman, Simple Diaphragm Pressure Regulator for Cryogenic Bath Temperatures. *Rev. Sci. Instrum.* 35, 749, 1964.
- 21) L. C. Jackson, H. Preston-Thomas, H. H. Wills, A small gas-cooled cryostat for temperatures between 4°K and 14°K. *J. Sci. Instrum.* 28, 99, 1951.
- 22) T. M. Dauphinee, D. K. C. MacDonald, H. Preston-Thomas, A new semiautomatic apparatus for measurement of specific heats and the specific heat of sodium between 55 and 315°K. *Proc. Roy. Soc. A* 221, 267, 1954.
- 23) C. A. Swenson, R. H. Stahl, Efficient cryostat for producing temperatures between 4° and 80°K. The production of liquid hydrogen targets using liquid helium. *Rev. Sci. Instrum.* 25, 608, 1954.
- 24) A. C. Rose-Innes, R. F. Broom, A simple desorption system for obtaining temperatures above that of liquid helium. *J. Sci. Instrum.* 33, 31, 1956.
- 25) N. V. Zavaritskii, A cryostat for intermediate temperatures. *Prib. i. Tekh. Eksper.* 140, 1956.
- 26) G. Klipping, Ein Heliumverdampfer zur Erzeugung tiefer Temperaturen. *Kältetechnik* 13, 250, 1961.
- 27) G. Klipping, Kryotechnik-Experimentieren bei tiefen Temperaturen. *Chemie-Ing.-Techn.* 36, 430, 1964.
- 28) G. Klipping, The continuous-flow-cryostat system-other approaches to open cycle cold fluid refrigeration. *Proceedings on Low-Temperature Refrigeration for Microwave Systems.* Bosten Technical Publishers, Inc., Cambridge, Mass., 1967, p. 261.
- 29) G. Klipping, R. Vanselow, Einstellung tiefer Temperaturen im Feldionenmikroskop durch kontinuierliche Verdampfung flüssigen Heliums. *Z. phys. Chem., N.F.* 52, 195, 1967.
- 30) U. König, A. Tippe, W. Dallügge, Ein Verdampferkryostat für Neutronenexperimente. *Kerntechnik* 10, 371, 1968.
- 31) G. Höhne, G. Klipping, J. Ludewig, A. Tippe, H. Walter, Tief-temperatur-Röntgenkammeras. *Z. angew. Physik* 25, 250, 1968.
- 32) W. Bächler, G. Klipping, W. Mascher, A cryopumping system down to 2.5 K. *Transactions of the 9th Vacuum Symposium,* Pergamon Press, 1962, p. 216.
- 33) G. Klipping, W. Mascher, Vakuumherzeugung durch Kondensation an tiefgeköhlten Flächen. II. Die Kondensation von Wasserstoff und Stickstoff an einer definierten Kaltfläche. *Z. angew. Physik* 16, 471, 1963.
- 34) W. Wiedemann, W. A. Mundt, D. Kullmann, A cryostat for Mössbauer experiments in the temperature range from 4 to 300°K. *Cryogenics* 5, 94, 1965.
- 35) G. Klipping, Kontinuierliche Kühlung zwischen 1 und 293°K. *Elektrotechn. Z.* 89, 308, 1968.
- 36) G. Klipping, U. Ruppert, H. Walter, High constancy temperature control for small

continuous flow cryostats.

To be published in Proceedings of the 4th International Cryogenic Engineering Conference, Eindhoven, May 1972.

- 37) G. Klipping, D. Vetterkind, G. Walentowitz, An electrical temperature control for continuous flow cryostats between 4.2 and 293°K. *Cryogenics* 5, 76, 1965.
- 38) G. Klipping, W. D. Schönherr, W. Schulze, Stabilisation of the temperature of continuous flow cryostats at temperatures from 4.2 to 15K. *Cryogenics* 10, 501, 1970.
- 39) P. Lynam, R. G. Scurolock, Vertical and horizontal temperature profiles in the necks of liquid helium dewars. Proceeding of the Second International Cryogenic Engineering Conference, Brighton, 1968, p. 141.
- 40) J. Nicol, H. V. Bohm, Continuous Refrigeration between 4.2°K and 1°K. *Adv. Cryogen. Engng.* 5, 332, 1960.
- 41) J. N. Chubb, *Cryogenic Devices*. U. S. Patent No. 3, 353, 365.
- 42) A. Elsner, G. Hildebrandt, G. Klipping, Verfahren zur Regulung der Temperatur und des Flüssigkeitsstandes in einem Helium-Kryostaten unterhalb 4.2 K. I. and II. *Kältetechnik* 18, 233, 267, 1966.
- 43) A. Elsner, G. Hildebrandt, G. Klipping, Control system for temperature and liquid level in a helium cryostat below 4.2 K. *Inst. Int. du Froid, Comm.* 1, Boulder, 1966, Annexe 1966-5, Suppl. Bull. Inst. Int. Froid, p. 143.
- 44) A. Elsner, G. Hildebrandt, G. Klipping, Verfahren zur Regulung der Temperatur und des Flüssigkeitsstandes in Heliumkryostaten unterhalb des λ -Punktes. *Dechema-Monographien* 58, 9, 1968.
- 45) A. Elsner, G. Klipping, Control system for temperatures and liquid level between 4.2 and 1 K. Transportation of helium through superfilters. *Adv. Cryogen. Engng.* 14, 416, 1968.
- 46) A. Elsner, G. Klipping, Temperature and level control in a liquid helium-II cryostat. To be published in *Adv. Cryogen. Engng.* 1972.
- 47) A. Elsner, Helium flow through filters. To be published in *Adv. Cryogen. Engng.* 1972.
- 48) T. H. K. Frederking, A. Elsner, G. Klipping, Liquid flow rates of superfluid helium II during thermomechanical pumping through porous media. To be published in *Adv. Cryogen. Engng.* 1972.
- 49) L. G. Rubin, Cryogenic thermometry : a review of recent progress. *Cryogenics* 10, 14, 1970.