1° K 以下の冷凍

永 野 弘

東京大学物性研究所 東京都港区六本木 7-22-1

(1968年11月12日受理)

The Refrigeration below One Degree Kelvin

Hiroshi NAGANO

Institute for Solid State Physics, University of Tokyo, 7-22-1 Roppongi, Minato-ku, Tokyo

(Received November 12, 1968)

Several methods of refrigeration are available to attain the temperature below one degree Kelvin. These methods utilize adiabatic demagnetization of paramagnetic salts, adiabatic magnetization of superconductors, a Helium three refrigerator and a Helium three-Helium four mixing or dilution refrigerator. The principles and the combination of these refrigeration methods are discussed.

Other methods such as the refrigeration using mechano-caloric effect of Helium II, a Helium three expansion engine which produces cold due to the work done against the osmotic pressure and an adiabatic compression method of Helium three are also reviewed.

1. はじめに

液体ヘリウム（沸点 4.2°K）の入った魔法瓶を真空ポンプで減圧すると、液体ヘリウムは急速に気化して、これとともに液体の温度は、1°K前後に下がってくる。しかしこれ以下の温度をつくることは難しい。それは液体の比熱と気化の潜熱の関係によるのであるが、そのほかにヘリウムでは、2.172°KでHe IIという別の液相に転移し、このHe IIは熱伝導がきわめてよいこと。魔法瓶の器壁を伝って薄膜となって上昇し、その膜は上の方に広がってゆき、そこでも気化するなどの特殊な性質を持っているからである。このため余程大きなポンプでないと、充分な真空に引き去ることができない。大きな拡散ポンプや、エジェクター

ポンプなどを使って、0.7°Kに達したという報告はあるが¹⁾、実用的にある程度の大きさの排気系を使って達せられる温度は、1°K 辺り(1°Kで0.1217mmHg)なので、1°K以下の温度の生成には、別の原理が考えられることとなる。

これら別の方法には、次のようないろいろのものがある。断熱消磁法 (adiabatic demagnetization, 又は magnetic cooling)²⁾ He³ 冷凍器 (Helium-3 refrigerator)³⁾ He³-He⁴ 混合 (又は稀釈) 冷凍器 (He³, He⁴ mixing or dilution refrigerator)⁴⁾ 超電導の断熱磁化 (adiabatic magnetization of superconductor)⁵⁾ He⁴ の圧力温度効果 (mechano-caloric effect of He II)⁶⁾ He³ の断熱圧縮法 (adiabatic compression of He³)⁷⁾

- 1) W.H. Keesom: Helium p. 178 (1942)
Elsevier
- 2) C.G.B. Garrett: Magnetic Cooling, Harvard Univ. Press. (1954)
- 3) Gorter ed.: Prog. Low Temp. Phys. 3
North-Holland. (1961)
- 志貴豊一郎: 低温工学 3 (1968), 物性 10

- 月 (1965)
- 佐々木 亘: 物性11月 (1965)
- 4) Allen, J.F. ed.: Super fluid Helium.
Academic (1966)
- 5) Yaqub, M.: Cryogenics 1 (1960) 101.
- 6) Mendelssohn, K.: Handbuch der Physik 15
Springer
- 7) Pomeranuk, J.E.T.P. 20 (1950) 919.

などを考えることができる。

2. 断熱消磁法

この方法は、1926年に Debye⁸⁾ と Giauque⁹⁾ が別々に理論を発表したもので、その後1933年に米国において Giauque が、和蘭において de Haas らが実験に成功したものである。

冷却の原理は既に幾多の成書にあるように、ガスの液化に似ている。すなわち、ガスを等温圧縮してそのエントロピーを減少させ、次に断熱膨脹によって温度を下げるのと同様に、常磁性塩に含まれるイオンを用いて行なうのである。常磁性の物質では（スピン磁気能率が各原子に残っているために、それぞれの原子は1個の永久磁石のようにになっている）外部から磁場 H をかけてやれば、原子磁石は磁場方向に整列しようとする。常温のばあいには、原子磁石の乱雑な熱運動のために、磁場方向に揃ったと考えられるものは、そのごく一部に過ぎないが、1°K 近くの温度になると、熱運動が弱くなっているために、大部分の原子磁石は磁場方向に整列してしまう。このとき、整列が完全なほど運動の自由度は制限されるから、系のエントロピー

$$(S^p = NR \frac{\partial}{\partial T} (T \log e(H \cdot T)))$$

$$\text{ここに } e(H \cdot T) = \frac{\sinh\left\{(2S+1) \frac{\beta H}{kT}\right\}^*}{\sinh\left\{\frac{\beta H}{kT}\right\}}$$

と表わされるが）は減少して、熱がはきだされることとなる。

この熱を適当な方法でとり去って、体系の温度を T_1 に保っておいたとすれば、その状態は磁場 H をかけたことによって、図1の点 E から点 B に移ることとなる。つぎに、常磁性塩と外部とを、熱的に絶縁したうえで、いままでかかっていた磁場をとり除いたとすれば、この時、体系の状態は $H=0$ の元の曲線上の点（状態）に戻らなければならない。磁場を除けば、原子磁石は制限を解かれて、再びばらばら勝手な方向をとることができるようになる。それ故、もし温度が T_1 にそのまま保たれたとすれば、熱平衡になるためには、制限の新たに解けた自由度を、他の（格子系）自由度と同じ温度に引き上げるために供給すべき

図1 Fe(NH₄) alum のエントロピー、温度線図
(磁場 H をパラメータとする)

エネルギーを、体系の外から熱として吸収しなくてはならない。しかるに体系は、断熱的であり、格子系のエントロピーを S^{ac} とすれば、 $S^p + S^{ac} = \text{一定}$ で外部から熱を得ることができないので、体系の温度、すなわち各自由度に分配されているエネルギーの平均値が下がって、新しく解けた自由度に与えるべきエネルギーをとりだすこととなる。いいかえれば、断熱体系であるから、消磁による原子磁石のエントロピーの増加につり合うまで、常磁性塩の熱運動のエントロピーは減少して、体系全体のエントロピー S_2 は一定に保たれることとなる。図では、系の状態は $S_2 = \text{一定}$ の線に沿って温度は T_1 から T_2 に減少する。格子系のエントロピーはほとんど零に近いので、 $S^p = \text{一定}$ とも考えられ、これより $\frac{\beta H}{kT} = \text{一定}$ $T \propto H$ となる。

常磁性塩の断熱消磁では、 $T \propto H$ から、外部磁場 H を零にすれば、限りなく低い温度に到達できるというわけにいかない。これには、常磁性イオンがその回りに規則的に配列している、他のイオンによる結晶電場による束縛と、原子磁石同志の磁氣的相互作用のために互いに影響し合っ、ある程度規則正しい配列をとるからである。このために、常磁性塩として結晶水を多く含んだ明礬類を使い、この結晶水でイオンを互いに離ればなれとして、相互作用を少なくすることを目的としている。また電子の磁気能率よりも弱い、原子核磁気能率を利用することも考えることができる¹⁰⁾。

8) Debye, P.: Ann Physik **81** (1926) 1154.

9) Giauque, W.F.: J.A.C.S. **49** (1927) 1870.

* Fowler, Guggenheim. Statistical Thermodynamics.

10) C.J. Gorter: Phys. Z. **35** (1934) 923.

N. Kürti & F. Simon: Proc. Roy. Soc. (London) A **149** (1935) 152.

断熱消磁は、図2に示すような過程をたどって冷却されるが、常磁性塩を Vacuum Can の中につるし、Exchange Gas を封じて磁化熱を取り去り、その後 Can の中を断熱真空にするための真空系、He bath を減圧するための排気系、磁石（最近では超電導磁石）、温度の測定用コイルなどを必要とする。写真は常磁性塩を入れた Vacuum Can と、その回りにあるのは超電導磁石である¹¹⁾。

冷却用としてよく使われる常磁性塩には、次の条件が必要となる。まず作り易いこと、変質しないこと、目的とする温度領域で比熱が大きいことの3点から Cr^{3+} 、 Mn^{2+} 、 Fe^{3+} などの塩が使われる。0.007°K ~ 0.01°K ならば Cr. K. alum, 0.01°K ~ 0.1°K には $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2$ alum, 0.1°K ~ 0.3 ~ 4°K には $\text{Mn}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ がよく用いられるが、また $\text{Ce}_2\text{Mg}_3(\text{NO}_3)_{12} \cdot 24\text{H}_2\text{O}$ は 6×10^{-3} °K 以上で熱力学温度 T と帯磁率の測定から求められる Magnetic な温度 T^{M} (*) が一致しているので、やはりよく用いられる。

図2 断熱消磁法の冷却過程

断熱消磁後、低い温度を保つために色々の注意が必要となる。たとえば、塩の位置している Vacuum Can を液体ヘリウム（減圧して1°K）で囲んだとしても、塩の温度はまだ2ケタも低いわけであるから、Heat Leak を極力抑えなければならない。Heat Leak の原因としては、輻射、固体を通しての熱伝導、気体による熱伝達と吸着、振動などを考えることができる¹²⁾。

熱輻射は T^4 法則に従うゆえ、表2のようになるから、高い温度からの輻射は特に注意を要する。このた

写真1 断熱消磁の Vacuum Can と超電導磁石外観

表1 断熱消磁に使う塩の特性

	Shottky の山	協同現象の山	b Joule/mol. day	a Joule/mol. day	mol weight
Cr. K. alum	~0.08°K	~0.02°K	0.135	4.11×10^{-3}	499.4
Cr メチルアミン alum	~0.1	~0.02	0.162	3.91	492.4
$\text{Fe}(\text{NH}_4)_2$ alum	~0.08	~0.04	0.112	3.52	482.2
$\text{Mn}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2$ $6\text{H}_2\text{O}$	—	0.12	0.128	—	391
$\text{Ce}_2\text{Mg}_3(\text{NO}_3)_{12}$ $24\text{H}_2\text{O}$	—	—	6.24×10^{-5}	—	714.8

$$b, a \text{ は } c = \frac{b}{T^2} + aT^3 \text{ の常数}$$

11) A.C. Anderson : Cryogenic Engineering News. 75 Aug 1967

12) A.H. Cooke, R.A. Hull : Proc. Roy. Soc. A 181 (1943) 83.

Wheatley, Griffig, Estle : R.S.I. 27 (1956) 1070.

大坪 秋雄 : 物性, 4月, 1966

Hoarse, Jackson, Kūrti : Experimental Cryo-physics (1951)

表2 輻射

常 温	300° K	2.8×10^7 ergs/min cm ²
液体空気	90	2.2×10^5
水 素	20	5.5×10^2
	1	3×10^{-8}

表 3

1° Kにおける熱伝導度	
Pyrex ガラス	~0.1 mW/cm day
アクリル樹脂	~0.4
Pyrex ガラス	$1.2 \times 10^{-4} T^{1.6}$ Watt/cm-day (1.0~0.29° K)

表4 He Vapor Pressure (おおよその値である)

1° K	0.5° K	0.3° K	0.1° K
0.1mmHg	10^{-5}	10^{-10}	10^{-32}

めには、ガラス管にはアクアダックを塗ったり、Al箔でつつんだりする他、Radiation Trap といって、直接高温が低温を跳かないように導管を折り曲げる必要がある。固体を伝っての熱伝導は、断面積 A を小さく、長さ L を長く、熱伝導度 κ の悪いものを用うべきである。さらに気体を通しての Heat Leak については、残留気体が少ないこと、すなわち真空が 10^{-6} mmHg 以下であればよいが、それでも 0.1°K で He^4 は 10^{-32} mmHg の圧力であるから、 He は壁から脱着して塩に吸着してくる。これに対して、別の常磁性塩を先に消磁して、ゲッターの役をさせることもある。振動については、機械的振動には発熱を伴うことは、Wheatley らの実験によって明らかにされている。この振動の影響は人によって異なり一概に言えないが、Ambler, Hudson¹³⁾ によると、彼らの Cryostat の Heat Leak $20 \sim 40$ erg/min の大半は振動によるといっている。このためには Low Frequency の振動を防ぐ上にも、木製の支持台を用いるとよい。また、冷却に用いる塩は図3のように支持するが、硝子受け皿で振動の受けにくいようにしておくといふ。

- 13) Ambler, Hudson : Magnetic Cooling, Reps. on Prog. Phys. **18** (1955) 282.
 14) S.C. Collins, F.J. Zimmerman : Phys. Rev. **90** (1953) 991.
 15) K.R. Wilkinson, J. Wilks : Proc. Phys. Soc. London A **64** (1951) 89.

図3 断熱消磁クライオスタット
a. Leiden 型 b. Oxford 型

磁場をかけたり磁場を切ったりするばあい、磁束が金属を横切るから、渦電流が発生するが、eddy current heating は針金の径 r の4乗に比例するから、細い針金を束ねて用いれば、渦電流による heating を少なくすることができる。

Vacuum Can の中に exchange gas を入れ、常磁性塩の磁化熱を取り去る。しかる後、Vacuum Can の中を真空にするという方法は、高い真空を得るために時間を要する。このために Exchange Gas に代わる方法として、thermal valve が考えられる。機械的な熱接触の on-off¹⁴⁾、超電導体の正常状態と超電導状態の熱伝導の相違¹⁵⁾、液体ヘリウムと固体ヘリウムの熱伝導の相違¹⁶⁾、 He^3 の僅かに混った液体 He^4 によるもの¹⁷⁾などがある。

機械的な on-off は、振動が入る不利な点があり、 He^3 - He^4 混合液を熱伝導の悪い細い管に入れたものは He^3 の拡散の圧力と He^4 の噴水効果の圧力などのバランスで決まるが、0.5% He^3 の混合液を満した、0.058" i.d. の長さ 1" の毛細管でつくった thermal valve は、上の方向に 30 erg/sec deg., 下の方向に 10,000 erg/sec deg. の熱を 1°K 以上で伝える。しかし最も実用的に用いられるものは、やはり超電導体である。これは超電導状態と、これに磁場をかけて常電導状態としたばあいとでは、熱伝導度が異なることを

- 16) Heer, Barnes, J. Daunt : R.S.I. **25** (1954) 1088.
 Heer, J. Daunt : Phys. Rev. **76** (1949) 854.
 17) Hwang, Fulton, W.M. Fairbank : Bull. Am. Phys. Soc. II **1** (1956) 4, 217.

利用する。

一般に熱伝導度 κ は、電子によるもの、格子によるものの和と表わされるが、しかし、超電導体では格子による伝導のみで表わされるので、たとえば Pb では

$$\kappa_n = aT \cong 4T \text{ watt/cm} \cdot \text{deg}$$

$$\kappa_s = bT^3 \cong 8 \times 10^{-2} T^3 //$$

で、その比は $\frac{T^2}{50}$ となる。Ta では κ_s/κ_n は凡そ 1/60 (0.55°K), Sn では $\kappa_s/\kappa_n \sim 1/40$ (0.65°K) であって、超電導状態の方が悪い。これは図4から明らかである。図4は、Cr·K·alum に長さ 56cm, 太さ 0.017cm の Ta 線をつけ、他端を液体ヘリウムに浸して、線を伝ってくる heat leak による塩の温度上昇を示しているが、Ta 線に磁場をかけて常伝導とした時、塩の温度は急激に上っていることから判る。

図4 超電導状態と正常状態における熱伝導の違いを塩の温度上昇より求める。

さてこの thermal valve があると、断熱消磁を多段にすることができる¹⁸⁾。まず普通の1段の断熱消磁では、Exchange gas を使わずに、Vacuum Canの中を最初から高い真空にしておいても、磁化による発熱は、thermal valve で取り去ることができる。すなわちこの時、同時に超電導の thermal valve にも磁場をかけて常電導状態とし、(この時は熱伝導はよいから)常磁性塩の磁化に伴う発熱を、上部にある He bath に伝える。このようにして磁化熱を取り去った後、thermal valve の所の磁場を零として超電導状態とし、塩の消磁を行えばよい。こうして常磁性塩は断熱状態に保たれることとなる。この方法を二つ以上の常磁

図5

2段の断熱消磁の鉛でこの A, B, V が Vacuum Can の中に位置している。

まず、磁石により A, B を磁化し、Exchange gas (または別の thermal valve) でこれらの磁化熱を除き、Can の中を真空としたら、磁石を除々に下に下げてくると A 段は消磁される。A の消磁により B は冷やされてゆくが、A を完全に消磁し、B と平衡になった所で、鉛の valve の所の磁場を臨界磁場以下とし、A と B を熱的に切り離す。次に B を消磁する。

この方法で、4200 Oe の磁場で T^* (塩の帯磁率より測定した磁氣的温度) は Cr·K·alum の所で 0.009°K を得た。これは熱力学的な温度に換算すると、0.003°K となる。これは1段のとき出発温度を 1.05°K として 15200 Oe より消磁したばあいに相当する。消磁後の温度上昇は、極力機械的振動を防ぎ、1 erg/min の割合である。9000 Oe から行なった時は $T^*=0.0045^{\circ}\text{K}$ $T=0.001^{\circ}\text{K}$ に達した。

上のような方法とは別に、heat leak の為に除々に試料の温度上昇することを防ぎ、一定温度を保つように cyclic な方法がある¹⁹⁾。

Daunt, Heer らは図6のように、作業物質として常磁性塩 P を使い、P の両端に V_1, V_2 なる thermal valve を付け、 V_1 は He bath (1°K) に、 V_2 は R (Reservoir) につないだ。まず V_1 を開いて (常電導状態とする) P を磁化する。磁化熱は V_1 を伝って He bath に取り去られる。次に V_1 を超電導状態とし、 V_2 を常電導状態として、P を消磁する。P と R とが熱平

18) J. Darby *et al*: Proc. Phys. Soc., London
A 63 (1950) 1179,
A 64 (1951) 861.

19) C.V. Heer, C.B. Barnes, J.G. Daunt :
P.R. 91 (1953) 412.
P.S.I. 25 (1954) 1088.

図6 Magnetic refrigerator

衡に達したら V_2 を超電導とし、また最初から同じことを繰り返す。このサイクルは先に図1に示したように、断熱的に B から C まで消磁する、この際、磁場はまだ零とせず、 $C \rightarrow D$ では等温的に磁場をほとんど零まで減少させる。これは C 点になった時、 V_2 を開いて、 R から P に流れる熱流を補えるように、残りの磁場を減少させてゆくこととなる。 D 点に達したら再び磁化して A に戻る。その後 V_1 を開いて等温的に B まで磁化する。このような過程で、 R から CDMN に当たる熱が cycle 当たり取り出されることになる。

このばあい、valve の on-off によって温度の高低の波が R に入って、 R の温度は必ずしも正確に一定でない。しかし、 R に大きな熱容量を持たせれば、平衡に達するまでの時間はかかるが、温度変化の振幅は小さくなる。

Daunt らは2分の周期で 7 kOe の磁場を用い、 R に 3000 Oe かけた状態で 0.3°K に冷やすに40分間要し、 0.2°K にまで90分を要した。熱を取り去る量は、 0.26°K で $0.85 \times 10^4 \text{ erg/cycle}$ であったが、もし R に磁場をかけなければ、 R の比熱は小さいので 0.3°K まで6分で冷えるという。

この cyclic な磁気冷却法もまた多段にすれば、

20) J.E. Gordon, H.B. Silsbee : Proc Vth Int. Conf. Low Temp. Phys & Chem. (1958)

21) H. London *et al* : P.R. 128 (1962) 1992.
Neganov. *et al* : J.E.T.P. 50 (1966) 1445.

Daunt らの 0.2°K より遙かに低い温度に達することができる²⁰⁾。

3. He^3 , $\text{He}^3\text{-He}^4$ 冷凍器

He^3 冷凍器については、既に幾つかの解説があるのでそれらを参照されたい。冷凍器としては、実験の種類によって一回 Liq He^3 を溜めてこれを減圧する方式と、循環方式がある。 He^3 の蒸気圧は同じ温度の He^4 より高いこと、 He II のような超流動を起こさないことに利点がある。

$\text{He}^3\text{-He}^4$ 混合冷凍器については、最初 H. London がその考えを提出し、1966年に幾つかの実験の成功が報じられた²¹⁾。

He^3 と He^4 の混合液は、温度を下げ 0.87°K 以下になると、二つの相に分離する。 He^3 濃度の濃い相は軽いので上に、 He^4 の濃い相は重いので下になる。そして pure な He^3 を He^4 の液に混合すると、これは吸熱反応を起こす。これらのことから、適当な方法で He^4 の濃い液から He^3 を除いて、この He^3 を分離している液相面から He^4 の濃い相に拡散させてやれば、段々とこの部分が冷えることとなる。これはあたかも高圧の He^3 が、低圧の He^4 真空中に、分離した相の境界面を通して Joule-Thomson 膨脹するような形となる。

図8は、 He^3 を循環させるこの冷凍器を示すもの

図7 $\text{He}^3\text{-He}^4$ の Phase Diagram

H.E. Hall *et al* : Cryogenics 6 (1966) 80.

Vilches & Wheatley : US Atomic Energy Comm. Report COO-1198-410

図8 He³-He⁴ Mixing Refrigerator (Wheatley より)

で、 P と記したところは真空ポンプで、ポンプから排気された He³ はトラップを通り、減圧 He bath 中で液化し、さらに蒸溜器 S を通って、一段と冷やされ、熱交換器 H を通り、混合器 M (Mixing chamber) に至る。 M の所で He³ は He⁴ rich の相に拡散し、拡散した He³ は熱交換器 H を戻り、 S の所で蒸発してポンプに至る。 S の所では、He³ は分別的に蒸発気化する。この所の温度は 0.6°K 以下にならないと、分別気化がうまく行なわれにくくなる。

M において熱を取り去る能力は

$$W_M = m \left(L_{03} - NE_{03} + \frac{5}{2} RT_M - \int_0^{T_M} C_3 dT \right)$$

と与えられる。 m は循環する He³ の割合、 L_{03} 、 NE_{03} は He³ および He⁴ 中での He³ の binding energy、 C_3 は He³ (pure) の比熱である。

ここで、熱交換器として tube in tube の型式が使われているが、最近、銅粉を焼結したものを二つずつ組み合わせた熱交換器や、Cu foil を巻いた熱交換器が用いられる。これらは flow impedance が小さく伝熱面積が大きいので使われるようである。Wheatley らはこの熱交換器を用い 0.02°K に達し、一時的に He³ の循環を中止して 0.0137°K に達した。熱交換においては金属壁と液体の間に Boundary Resistance があり、これは T^{-3} に比例するから、最低温度は、この熱交換に使われる伝熱面積によるものと思われる。

4. 超電導の断熱磁化²²⁾

超電導体と、これを磁化して常電導状態とした時とで、エントロピー差は

$$S_n - S_s = -\frac{H_c}{4\pi} \frac{dH_c}{dT}$$

と与えられる。図9に示すように、両方のエントロピーと温度の関係から、 T_i なる温度の超電導体を断熱的に磁化すれば、温度は T_f に下がってくる。

この方法は図10に示すようなやり方となるが、この方法は常磁塩の断熱消磁に比較して、比熱が T に比例して減少するために、 0.1°K 近くで、単位体積当りの冷凍能力 cal/cc が小さい欠点がある。その割には温度が下がるので、低い温度にある時間保つことは困難である。磁化に際しての eddy current による

図9 超電導状態と正常状態のエントロピー-温度の関係

22) M. Yaquab : Cryogenics 1 (1960) 101

図10 錫超電導の断熱磁化クライオスタット

heating の loss もある。しかし用いる磁場が低くてよいので、(1)大きな試料を使うことができる。(2)熱伝導度がよい。(3) 1°K から 0.3°K 近くまでの間では、比熱の関係からも常磁塩に匹敵し得るという。

5. He^4 の Mechano-caloric effect と He^3 の Adiabatic compression など

液体ヘリウム II を容器に入れて、図11のように P にエメリー粉をつめて、液面から持ち上げると、 He II 中にある超流体は P から下に流れ落ちて、この超流体はエントロピーを運ばないから、残った液の温度は上昇する²³⁾。この逆になれば温度が下がると考えられる。 He II では超流体と正常流体の混合という考えから He II の密度は

$$\rho = \rho_s + \rho_n$$

と表わされ、温度により ρ_s , ρ_n の割合は、図12のようになる。この割合を変えることが温度の変化につながるので、図13のように、 He II の中に遠心ポンプとエメリー粉のフィルターを置いて、 ρ_s の部分を透過

図 11

図12 超流体および正常流体の割合と温度の関係

図 13

23) J. G. Daunt K. Mendelssohn : Nature **143** (1939) 719.

24) F. A. Staas : L. T. 11 abstract (1968)

図14 三段階断熱消磁 (Peshkov)

- (1) He³ bath
- (6)
- (8) } 常磁性塩
- (13)
- (5)
- (7) } thermal valve
- (10)

させていくとその温度は下がってくる。実験によれば 1.5°K から 0.6°K に下がってくる²⁴⁾。

同じように、ポンプでなくヒーターによる thermo-mechanical effect を使って、Mechano-caloric effect を起こすことも考えられる。また Taconis らは He⁴ を満たしたペロー B と、He³-He⁴ 混合液の入った容器 A を毛細管で結び、ペローを圧縮して、He 超流体を A に入れてやることによって、He³ を滲透圧に抗して膨脹させ冷却させる方法²⁵⁾を提案している。

He³ の断熱圧縮については、He³ の固体と液体とでは、ある温度以下で核スピンの ordering から、液体の方が固体よりエントロピーが小さいと予想されるので、He³ 液体を断熱的に圧縮すれば温度が下がると考えられているが²⁶⁾、まだ断熱圧縮では予想通りの低温は得られていない。

最後にこれまで述べたいいくつかの方法、特に He³, He³-He⁴ refrigerator と断熱消磁の組み合わせは図14に示すように複雑となる。これは Peshkov の He³ 冷凍器で超電導の thermal valve, 3 段の常磁性塩を組み合わせたものであるが、今後このようにして μ 温度への到達²⁸⁾の方向に低温は進むことと期待される。

25) K.W. Taconis : Proc. ICECI (Kyoto) (1967)

// : 低温工学 2 No. 2 (1967)

26) I. Pomeranchuk : J.E.T.P. 20 (1950) 1919.

27) V. P. Peshkov : Soviet Physics J. E. T. P. 21 (1965) 663.

28) N. Kürti : Cryogenics 1 (1960) 1.