

第2章 ヘリウムの物性値

三木信晴*・尾形久直**・岩田善輔***

*東京芝浦電気(株)電機事業部電機技術研究所 神奈川県横浜市鶴見区末広町 2-4 (第2章1節担当)

** (株)日立製作所中央研究所 東京都国分寺市東恋ヶ窪 1-280 (第2章2節担当)

***古河電気工業(株)超高压研究所 神奈川県横浜市西区西平沼町 6-1 (第2章3節担当)

(1973年12月18日受理)

Properties of Helium

by Nobuharu MIKI*, Hisanao OGATA**,
and Zensuke IWATA***

*Heavy Apparatus Engineering Laboratory, Tokyo Shibaura Electric Co., Ltd.,
4, 2-chome, Suehiro-cho, Tsurumi-ku, Yokohama

**Central Research Laboratory, Hitachi, Ltd., Higashikoigakubo, Kokubunji, Tokyo

***Extra-High Voltage Laboratory, The Furukawa Electric Co., Ltd.,
6-1, Nishihirnuma-cho, Nishi-ku, Yokohama

(Received Dec. 18, 1973)

Synopsis :

The literature on the thermodynamic, electric and transport properties of helium 4 is reviewed.

The thermodynamic properties are shown to be calculated using the equations taken from the NBS report.

The data on the transport properties- viscosity and thermal conductivity- are assembled, and the NBS data are shown as the reliable values.

The electrical properties are also discussed regarding dielectric constant, loss tangent and electrical breakdown.

1. ヘリウム4の熱力学的状態式

ヘリウム4の熱力学的状態式については R. D. McCarty^(1,2) が有用な報告書を提供しており、ここでは NBS REPORT 9762 に基づいて以下に紹介しよう。

I. 液体-蒸気共存領域

A. 蒸気圧

ヘリウムの蒸気圧-温度関係式は次の二つの式によって表わされる。温度が 5.1994~2.172K の場合は

$$\ln P = \sum_{i=1}^{10} f_i T^{(2-i)} \quad (1)$$

であり、温度が 2.172~0.5K の場合は

$$\ln P = \sum_{i=1}^{14} a_i T^{(2-i)} \quad (2)$$

である。ここで、 T の単位は K であり、 P の単位は μHg である。式(1)の係数 (f_i) および式(2)の係数 (a_i) はそれぞれ Table 1, Table 2 に示される。上の二式は1958年に決定された関係式であり、その後の実験結果と比較して上式をもとに次式のように修正されている。

$$T = T_{58} + .001 + .002 T_{58} \quad (3)$$

これらの式を使い、ヘリウムの臨界圧力を 1705.0mm Hg とすれば臨界温度は 5.2014K となる。

B. 液体-蒸気共存領域の密度

飽和蒸気の密度は次式で示される。

$$\rho_g = \rho_c + \sum_{i=1}^6 S_{gi} (1 - T/T_c)^{i/3} \quad (4)$$

飽和液体の密度は次式で示される。

$$\rho_l = \rho_c + \sum_{i=1}^6 S_{li}(1-T/T_c)^{i/3} \quad (5)$$

ここで、 ρ は g/cm^3 で示され、 T は K で示される。また臨界密度 $\rho_c = 0.06964 \text{ g/cm}^3$ であり臨界温度 $T_c = 5.2014$ である。パラメータ S_g と S_l は Table 3 に示される。

II. 状態式

ヘリウムの状態式の第2 ビリアル係数は 2~1,500 K の温度では次式で表わされる。

$$B(b_i, T) = \sum_{i=1}^9 b_i T^{(1.5-i/2)} \quad (6)$$

ここで、 B は式 $P = \rho RT(1 + B\rho + \dots)$ の標準第2 ビリアル係数であり、単位は liter/mol である。式 (6) のパラメータ b_i は Table 4 に示される。状態式は次式で表わされる。

$$P = \rho RT \left[1 + B(b_i, T) \rho \right] + \sum_{i=1}^8 n_{1i} \rho^3 T^{(1.5-i/2)} + \sum_{i=1}^4 n_{2i} \rho^4 T^{(1.5-i)} + \sum_{i=1}^6 n_{3i} \rho^5 T^{(0.75-i/4)}$$

Table 1 Coefficients for Equation (1)

$$\begin{aligned} f_1 &= -3.9394635287 \\ f_2 &= 1.4127497598 \times 10^2 \\ f_3 &= -1.6407741565 \times 10^3 \\ f_4 &= 1.1974557102 \times 10^4 \\ f_5 &= -5.5283309818 \times 10^4 \\ f_6 &= 1.6621956504 \times 10^5 \\ f_7 &= -3.2521282840 \times 10^5 \\ f_8 &= 3.9884322750 \times 10^5 \\ f_9 &= -2.7771806992 \times 10^5 \\ f_{10} &= 8.3395204183 \times 10^4 \end{aligned}$$

Table 2 Coefficients for Equation (2)

$$\begin{aligned} a_1 &= -4.9510540356 \times 10^1 \\ a_2 &= 6.5192364170 \times 10^2 \\ a_3 &= -3.7075430856 \times 10^3 \\ a_4 &= 1.2880673491 \times 10^4 \\ a_5 &= -3.0048545554 \times 10^4 \\ a_6 &= 4.9532267436 \times 10^4 \\ a_7 &= -5.9337558548 \times 10^4 \\ a_8 &= 5.2311296025 \times 10^4 \\ a_9 &= -3.3950233134 \times 10^4 \\ a_{10} &= 1.6028674003 \times 10^4 \\ a_{11} &= -5.3541038967 \times 10^3 \\ a_{12} &= 1.1990301906 \times 10^3 \\ a_{13} &= -1.6146362959 \times 10^2 \\ a_{14} &= 9.8811553386 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &+ \sum_{i=1}^3 n_{4i} \rho^3 e^{r\rho^2} T^{(1.0-i)} + \sum_{i=1}^3 n_{5i} \rho^5 e^{r\rho^2} T^{(1.0-i)} \\ &+ \sum_{i=1}^2 n_{6i} \rho^6 T^{(1-i)} \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、 P は atm、 ρ は mol/liter、 T は K であり $B(b_i, T)$ は式 (6) で与えられる。式 (7) のパラメータは Table 5 に示されており三種類の値で示される。使用するパラメータの種類を $K=1, 2, 3$ で表わし圧力 $P=P(\rho, T, K)$ と表わせば、密度と温度の領域によって次のように圧力を求めることができる。

$$(1) \quad 15\text{K} \leq T$$

$$P = P(\rho, T, 3)$$

$$(2) \quad T \leq 10\text{K} \text{ および } \rho \leq 17.3987 \text{ mol/liter}$$

$$P = P(\rho, T, 1)$$

$$(3) \quad 10\text{K} \leq T \leq 15\text{K} \text{ および } \rho \leq 17.3987 \text{ mol/liter}$$

$$P = F \cdot P(\rho, T, 1) + (1-F) \cdot P(\rho, T, 3)$$

Table 3 Coefficients for Equations (4) and (5)

Equation (4)

$$\begin{aligned} S_{g1} &= -6.9267495322 \times 10^{-2} \\ S_{g2} &= -1.2925325530 \times 10^{-1} \\ S_{g3} &= 2.9347470712 \times 10^{-1} \\ S_{g4} &= -4.0806658212 \times 10^{-1} \\ S_{g5} &= 3.5809505624 \times 10^{-1} \\ S_{g6} &= -1.1315580397 \times 10^{-1} \end{aligned}$$

Equation (5)

$$\begin{aligned} S_{l1} &= 1.2874326484 \times 10^{-1} \\ S_{l2} &= -4.3128217346 \times 10^{-1} \\ S_{l3} &= 1.7851911824 \\ S_{l4} &= -3.3509624489 \\ S_{l5} &= 3.0344215824 \\ S_{l6} &= -1.0981289602 \end{aligned}$$

Table 4 Coefficients for Equation (6)

$$\begin{aligned} b_1 &= -5.0815710041 \times 10^{-7} \\ b_2 &= -1.1168680862 \times 10^{-4} \\ b_3 &= 1.1652480354 \times 10^{-2} \\ b_4 &= 7.4474587998 \times 10^{-2} \\ b_5 &= -5.3143174768 \times 10^{-1} \\ b_6 &= -9.5759219306 \times 10^{-1} \\ b_7 &= 3.9374414843 \\ b_8 &= -5.1370239224 \\ b_9 &= 2.0804456338 \end{aligned}$$

(4) $T < 5.2014 \text{ K}$ および $17.3987 \text{ mol/liter} \leq \rho$

$$P = P(\rho_g, T, 1) + P(\rho, T, 2) \\ - P(\rho_g, T, 2)$$

(5) $5.2014 \text{ K} \leq T \leq 10 \text{ K}$ および $17.3987 \text{ mol/liter} \leq \rho$

$$P = P(\rho_c, T, 1) + P(\rho, T, 2) \\ - P(\rho_c, T, 2)$$

(6) $10 \text{ K} \leq T \leq 15 \text{ K}$ および $17.3987 \text{ mol/liter} \leq \rho$

$$P = F \cdot [P(\rho_c, T, 1) + P(\rho, T, 2) \\ - P(\rho_c, T, 2)] + (1-F) \cdot P(\rho, T, 3)$$

ここで, $F = (15 - T)/5$ であり, ρ_g は飽和蒸気密度であり, $\rho_c = 17.3987 \text{ mol/liter}$ である。

Ⅲ. 他の状態量の算出

$<P\rho T$ 関係>の一般状態式から P, ρ, T 以外の

状態量を算出するための関係式を次に示す。まずエントロピーは

$$S = S_{T_0}^0 - R \ln \left(\frac{\rho R T}{P_0} \right) + \int_T^{\rho} \left(\frac{R}{\rho} - \frac{1}{\rho^2} \right. \\ \left. \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_\rho \right) d\rho + \int_{T_0}^T C_p^0 \frac{dT}{T} \quad (10)$$

で求められる。またエンタルピーは

$$H = H_{T_0}^0 + \int_T^{\rho} \left(\frac{P}{\rho^2} - \frac{T}{\rho^2} \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_\rho \right) d\rho \\ + \frac{P}{\rho} - RT + \int_{T_0}^T C_p^0 dT \quad (11)$$

で求められる。ここで $S_{T_0}^0 = 37.068 \text{ J/mol K}$, $H_{T_0}^0 =$

146.328 J/mol , $C_p^0 = 5/2R$, $C_v^0 = 3/2R$, $T_0 = 4.2144$

K , $P_0 = 1.0 \text{ atm}$ および $R = 0.0820558 \text{ liter} \cdot \text{atm/mol}$

$\cdot \text{K}$ である。定容比熱, 定圧比熱および音速は次式で

Table 5 Coefficients for Equation (7)

パラメータの種類 $K=1$

$$\begin{aligned} n_{11} &= 1.4792568148 \times 10^{-4} \\ n_{12} &= -3.2531355477 \times 10^{-3} \\ n_{13} &= 1.9518739286 \times 10^{-2} \\ n_{14} &= -1.0571817135 \times 10^{-1} \\ n_{15} &= 3.3164944449 \times 10^{-1} \\ n_{16} &= -5.1130022535 \times 10^{-1} \\ n_{17} &= 3.9940004906 \times 10^{-1} \\ n_{18} &= -1.5555244471 \times 10^{-1} \\ n_{21} &= 3.7405931828 \times 10^{-5} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} n_{22} &= -6.4103220333 \times 10^{-4} \\ n_{23} &= 1.8579366177 \times 10^{-3} \\ n_{24} &= 7.4007986606 \times 10^{-4} \\ n_{31} &= 4.1362357367 \times 10^{-5} \\ n_{32} &= -3.7910190353 \times 10^{-4} \\ n_{33} &= 1.3806454049 \times 10^{-3} \\ n_{34} &= -2.5085412058 \times 10^{-3} \\ n_{35} &= 2.3697560398 \times 10^{-3} \\ n_{36} &= -9.5726461066 \times 10^{-4} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} n_{41} &= 4.9062640310 \times 10^{-3} \\ n_{42} &= -2.6148004377 \times 10^{-2} \\ n_{43} &= 3.4221685545 \times 10^{-2} \\ n_{51} &= 5.4159662622 \times 10^{-6} \\ n_{52} &= -1.0687806777 \times 10^{-5} \\ n_{53} &= -8.9484651869 \times 10^{-6} \\ n_{61} &= -1.5096862619 \times 10^{-7} \\ n_{62} &= 6.4640898904 \times 10^{-7} \\ \gamma &= -2.5000000000 \times 10^{-3} \end{aligned}$$

パラメータの種類 $K=2$

$$\begin{aligned} n_{11} &= 2.0461501117 \times 10^{-5} \\ n_{12} &= 1.2746996288 \times 10^{-3} \\ n_{13} &= -2.0272929583 \times 10^{-2} \\ n_{14} &= 7.4648036615 \times 10^{-2} \\ n_{15} &= -1.7217966521 \times 10^{-1} \\ n_{16} &= 5.1053439738 \times 10^{-1} \\ n_{17} &= -4.0178202697 \times 10^{-1} \\ n_{18} &= 2.6829864632 \times 10^{-1} \\ n_{21} &= -3.2120950632 \times 10^{-5} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} n_{22} &= 1.4159018970 \times 10^{-4} \\ n_{23} &= 1.4725630701 \times 10^{-3} \\ n_{24} &= -2.6183549410 \times 10^{-3} \\ n_{31} &= -1.0246150954 \times 10^{-5} \\ n_{32} &= 8.5254608956 \times 10^{-5} \\ n_{33} &= -2.5163069255 \times 10^{-4} \\ n_{34} &= 3.2877709285 \times 10^{-4} \\ n_{35} &= -1.0601957580 \times 10^{-4} \\ n_{36} &= -1.0687738074 \times 10^{-4} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} n_{41} &= 7.9066012040 \times 10^{-3} \\ n_{42} &= -8.9393485656 \times 10^{-2} \\ n_{43} &= -1.5076580053 \times 10^{-1} \\ n_{51} &= 2.6882494327 \times 10^{-6} \\ n_{52} &= -3.3794316835 \times 10^{-5} \\ n_{53} &= -2.4495951195 \times 10^{-5} \\ n_{61} &= -4.2287454626 \times 10^{-8} \\ n_{62} &= 4.4529354413 \times 10^{-7} \\ \gamma &= -5.0000000000 \times 10^{-4} \end{aligned}$$

パラメータの種類 $K=3$

$$\begin{aligned} n_{11} &= -3.6027735292 \times 10^{-5} \\ n_{12} &= 1.6079946555 \times 10^{-3} \\ n_{13} &= -2.7441763615 \times 10^{-2} \\ n_{14} &= 1.4739506957 \times 10^{-1} \\ n_{15} &= -4.3559344838 \times 10^{-1} \\ n_{16} &= 1.3447956078 \\ n_{17} &= -1.7040375125 \\ n_{18} &= 9.0262674040 \times 10^{-1} \\ n_{21} &= 1.9661380688 \times 10^{-6} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} n_{22} &= 1.7122932666 \times 10^{-4} \\ n_{23} &= 2.3051000563 \times 10^{-4} \\ n_{24} &= -9.6564739100 \times 10^{-4} \\ n_{31} &= -2.3326553271 \times 10^{-7} \\ n_{32} &= 4.0855110880 \times 10^{-7} \\ n_{33} &= 1.0900567964 \times 10^{-5} \\ n_{34} &= -5.0060952775 \times 10^{-5} \\ n_{35} &= 1.1312765043 \times 10^{-4} \\ n_{36} &= -1.2539843287 \times 10^{-4} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} n_{41} &= 5.6875644111 \times 10^{-3} \\ n_{42} &= -1.4438146625 \times 10^{-1} \\ n_{43} &= 3.3768874851 \times 10^{-3} \\ n_{51} &= 1.0754201218 \times 10^{-6} \\ n_{52} &= -4.5264622308 \times 10^{-5} \\ n_{53} &= 3.8597388864 \times 10^{-5} \\ n_{61} &= -1.4802195348 \times 10^{-8} \\ n_{62} &= 4.1721791119 \times 10^{-7} \\ \gamma &= -5.0000000000 \times 10^{-4} \end{aligned}$$

求まる。

$$C_V = C_V^0 - \int_0^P \frac{T}{\rho^2} \left(\frac{\partial^2 P}{\partial T^2} \right)_\rho d\rho \tag{12}$$

$$C_P = C_V + T \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)^2 / \left(\rho^2 \frac{\partial P}{\partial \rho} \right) \tag{13}$$

$$w = \left[\left(\frac{C_P}{C_V} \right) \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right) \right]^{1/2} \tag{14}$$

圧力と温度から他の状態量を求める場合には式(7)を繰返し計算して、まず密度を求め、次に式(10)~(14)を用いて温度、密度からエントロピ、エンタルピ、比熱、音速を求める。なお、計算機プログラムについては NBS REPORT 10753 を参照してもらいたい。

2. 熱伝導度と粘性係数

(1) 従来のデータ

極低温におけるヘリウムの熱的性質、とくに熱伝達と流動にとってもっとも基礎的な物性値すなわち熱伝導度と粘性係数に関するデータはきわめて少ないのが現状である。

Fig. 1 は 50K 以下におけるヘリウムの熱伝導に関するデータを整理したものである⁵⁾⁶⁾⁷⁾。

一方 Fig. 2 は粘性係数に関するデータを示したものである⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾。このほか NBS において Steward らが温度 4~20K、圧力 10 MN/m² までの粘性係数を測定したが、その詳細は結果を除いてまだ公表されていない²⁾。

(2) 物性値の推定

粘性係数や熱伝導度の測定にはかなりの時間と困難さがともなうために、応用面からの必要性にせまられて、各所で物性値の推定が行われた²⁾⁷⁾¹⁰⁾¹²⁾¹³⁾。

比較的高温高密度の流体に対する熱伝導度、粘性係数の理論に Enskog 理論がある。NBS の Hanley ら

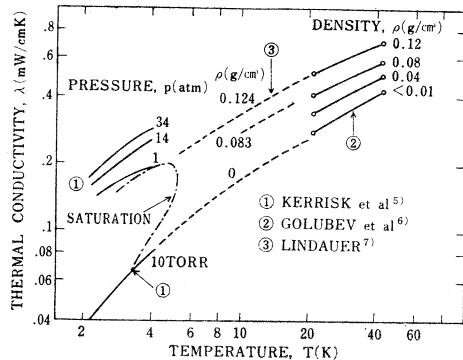


Fig. 1 Thermal conductivity data

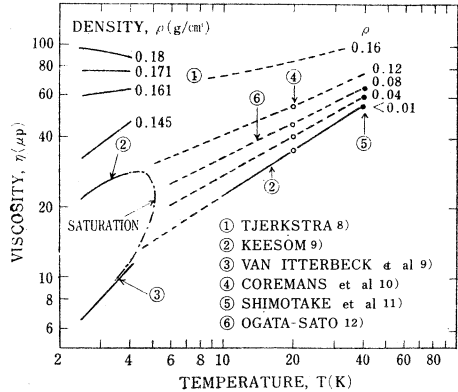


Fig. 2 Viscosity data

は、ヘリウムについて Enskog 理論を応用し、20~50 K における物性値を推定したが、たとえば 20K における計算値と実験値の一致はあまりよくない¹⁰⁾。Lindaner も同様にヘリウムの PVT 線図から Enskog 理論によって計算したが、4K 付近での実験との差が大きい⁷⁾。

粘性係数 η に関しては、NBS の Diller らが、希薄ガスの粘性係数 η₀ との差 Δη(=η-η₀) が密度 ρ の関数として表わされ、しかも温度に依らないことを H₂, Ar, O₂ のデータから結論し、ヘリウムに対しても応用した。彼らは、4K 以下の Tjerkstra のデータのみを引用したが、尾形らは 20K における Coremans らのデータを付加し、Fig. 2 ⑥のような曲線を得た。40 K 以上の高温ガスについては一般化された不活性ガスの粘性係数のチャート (H. Shimotake and G. Thodes) によって容易に求められ、その一例を Fig. 2 ⑤に示す¹¹⁾。

最近、NBS から R. D. McCarty によってヘリウムの物性値が広範囲にわたって整理され数表として刊行された²⁾。これは NBS から推奨された物性値として利用できるものである。(他の NBS 所内報³⁾⁴⁾には一部やや異なった値を使用しているものもある。)それによると、熱伝導度 λ は Golubev-Shpagina および Kerrisk のデータを基礎に、NBS の Roder や Arp によって求められた。300K 以下の λ は次式で求められる。

$$\lambda = \lambda_0(T) \lambda_y(\rho, T) + \lambda_c(\rho, T) \tag{15}$$

ここで、λ : [mW/cm·K], T : [K], ρ : [g/cm³]

$$\lambda_0(T) = \exp\{Z(\ln T)\} \tag{16}$$

$$Z(T) = -4.3611622157 + 1.9250159286 \ln T - 0.52544120165 (\ln T)^2$$

$$+0.090045763885 (\ln T)^3 \\ -0.0054773874708 (\ln T)^4 \quad (17)$$

$$\lambda_y(\rho, T) = \exp\{B(T)\rho + C(T)\rho^2\} \quad (18)$$

$$B(T) = \exp\{4.7470660612 - 5.3641468153 \ln T \\ + 3.4639703698 (\ln T)^2 \\ - 1.0702455443 (\ln T)^3 \\ + 0.1571349306 (\ln T)^4 \\ - 0.00892140047 (\ln T)^5\} \quad (19)$$

$$C(T) = 2.2109006708 + 187.74174808/T \\ - 1281.0947055/T^2 + 3645.2393216/T^3 \\ - 3986.6937948/T^4 \quad (20)$$

$$\lambda_c(\rho, T) = 0.000649578 \Delta C/(\rho, T) \quad (21)$$

$$\Delta C_p = C_p(\rho, T) - C_p(\rho, T=11.83\text{K}) : \\ [\text{J/mol}\cdot\text{K}] \quad (22)$$

ただし, $T > 11.83\text{K}$, $\rho > 0.12\text{g/cm}^3$
or $\Delta C_p < 0$ のとき $\lambda_c(\rho, T) = 0$ とする。

式(21)は臨界点付近の λ の上昇を示すものであるが、水素のデータを基礎にして定められた。式(15)の前記実験データとの一致は $\pm 10\%$ 以内である。

一方, 100K 以下の粘性係数については前述の Steward の実験を基礎にしている。確度は $\pm 8\%$ と報告されている。

$$\ln(\eta) = \eta_0'(T) + \eta_E'(\rho, T) \quad (23)$$

ここで, $\eta : [\mu\text{g/cm}\cdot\text{s}]$, $T : [\text{K}]$, $\rho : [\text{g/cm}^3]$

$$\eta_0'(T) = -0.135311743/\ln T \\ + 1.00347841 \\ + 1.20654649 \ln T \\ - 0.149564551 (\ln T)^2 \\ + 0.0125208416 (\ln T)^3 \quad (24)$$

$$\eta_E'(\rho, T) = \rho B'(T) + \rho^2 C'(T) \\ + \rho^3 D'(T) \quad (25)$$

$$B'(T) = -47.5295259/\ln T \\ + 87.6799309 \\ - 42.0741589 \ln T \\ + 8.33128289 (\ln T)^2 \\ - 0.589252385 (\ln T)^3 \quad (26)$$

$$C'(T) = 547.309267/\ln T \\ - 904.870586 \\ + 431.404928 \ln T$$

$$-81.4504854 (\ln T)^2 \\ + 5.37008433 (\ln T)^3 \quad (27)$$

$$D'(T) = -1684.39324/\ln T + 3331.08630 \\ - 1632.19172 \ln T + 308.804413 (\ln T)^2 \\ - 20.2936367 (\ln T)^3 \quad (28)$$

以上の結果を等圧線で図示すると Fig. 3, Fig. 4 のようになる。一般の不活性ガスと異なるのは液体の熱伝導度が温度降下とともに低下する点で（一般のガスは逆）、これは、ヘリウムが量子流体的挙動をしているためだといわれている。

(3) 今後の課題

今後は、これらの物性値の精度を高めること、とくに $4\text{--}20\text{K}$ 領域における実測や、擬臨界点近傍にお

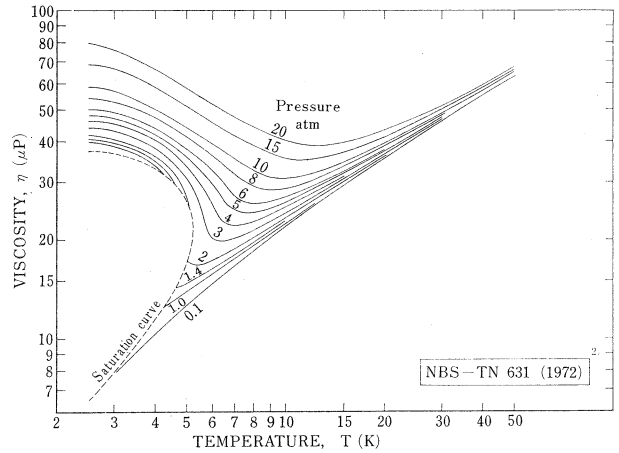


Fig. 3 Thermal conductivity of helium

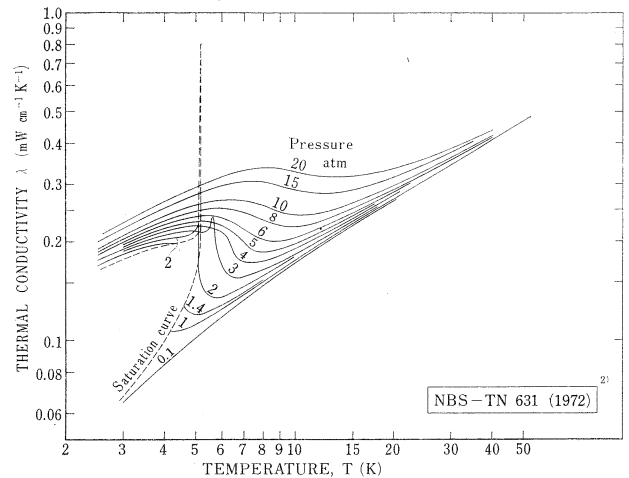


Fig. 4 Viscosity of helium

る熱伝導度のピーク現象の実験的証明，理論的検討などが課題であろう。

3. ヘリウムの電気特性

(1) 液体ヘリウムの誘電特性

液体ヘリウムの誘電率の温度特性を Table 6 に示す¹⁴⁾。誘電率の変化は密度の変化から推定できるものであり，表中に示すように Clausius-Mossotti の式

$$\alpha = \frac{3M}{4\pi\rho} \cdot \frac{\epsilon' - 1}{\epsilon' + 2} = \text{const} \tag{29}$$

M：分子量， ρ ：密度， ϵ' ：誘電率

がよく成立している。液体ヘリウムは，密度の点では液体水素の約2倍程度大きいにもかかわらず，誘電率の点では液体水素（約1.23）より小さい値となっている。

液体ヘリウムの誘電正接（ $\tan \delta$ ）は，液体水素，液体窒素と同様に， 10^{-6} 以下と非常に小さく，精密な絶対値の測定はなされていないが，相対的には液体水素

Table 6 Dielectric constant of liquid helium¹⁴⁾

Temperature °K	Dielectric constant ϵ'	Density ρ g/cc	$\frac{\epsilon' - 1}{\epsilon' + 2} \cdot \frac{1}{\rho}$
4.24	1.0469	0.1251	0.1232
2.24	1.0663	0.1471	0.1252
2.19	1.0663	0.1472	0.1253
2.15	1.0665	0.1465	0.1257
1.83	1.0626	0.1465	0.1265
273 (gas)	1.0000684	1.7847×10^{-4}	0.1279

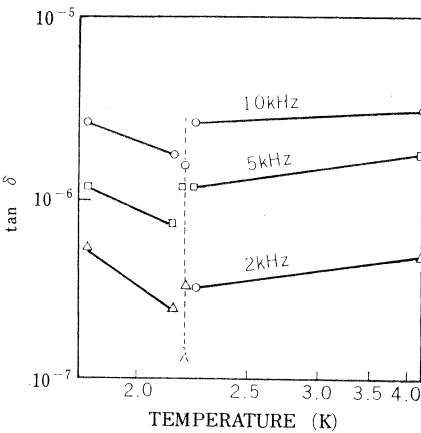


Fig. 5 Dissipation factor of liquid He versus temperature¹⁴⁾

より1桁程度大きい¹⁴⁾。Fig. 5 は，液体ヘリウムの誘電正接の温度特性である¹⁴⁾。 λ 温度での不連続性は損失の機構がわかっていないため理解しにくい，液体ヘリウム中のイオンの移動度が， λ 温度以下に低下

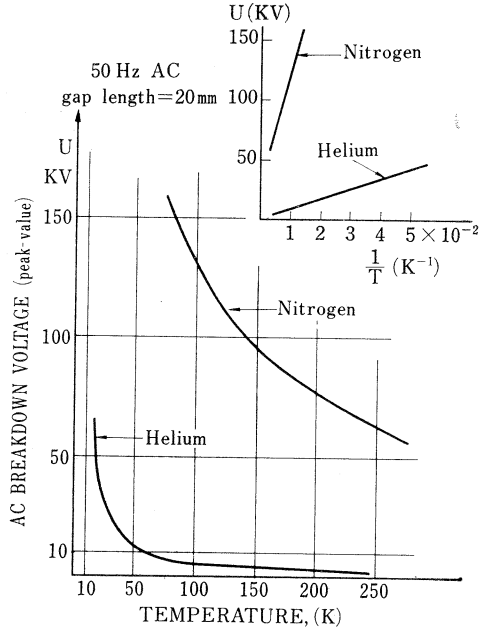


Fig. 6 AC breakdown voltage of liquid He versus temperature¹⁵⁾

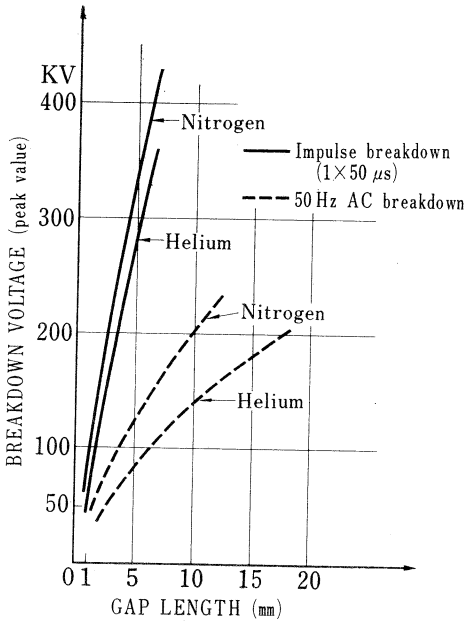


Fig. 7 Breakdown voltage of liquid helium versus gap length¹⁵⁾

するにつれて急速に増大することから、イオン移動の変化と定性的に対応している。将来超電導ケーブル等の高電圧絶縁に液体ヘリウムが用いられるような場合には、高電界下での誘電正接の増大現象に注目して研究する必要がある。

(2) ヘリウムの絶縁破壊特性

Fig. 6 に、ガスヘリウムの交流破壊電圧の温度依存性を示してある。液化温度近くまでは、ほぼ Paschen の法則が成立するといえる¹⁵⁾。Fallou 等の求めた、液体ヘリウムの沸点における交流およびインパルス破壊値を Fig. 7 に示す¹⁵⁾。交流に対しては、窒素等と比べ破壊電圧がかなり低い。インパルス破壊電圧は意外に高く、インパルス比（インパルス破壊電圧/交流破壊電圧 (Peak 値)）は液体窒素よりも大きい。交流の破壊に対しては、液体ヘリウム中の局部的気化が特に影響していると考えられている。直流電圧に対しては、最近の Meats の詳細な研究がある¹⁶⁾。Fig. 8 はヘリウムの相図上に等絶縁破壊強度曲線 (60mmφ の黄銅平板電極を用いて、ギャップ長 1mm で求めた値) をプロットしたもので、この図からヘリウムの状態が決まると絶縁破壊強度を知ることができる。前述の如く、ガス状態では、ほぼ Paschen の法則が成立し、密度とともに破壊強度も増大している。液相では加圧により破壊強度が増大する。超臨界領域ではヘリウムの破壊強度が非常に高いことが示されている。Fig. 9 には液体ヘリウムの破壊電圧 V と電極間隙 d の関係を示す¹⁶⁾。測定者によって値にバラツキがある。破壊電圧の電極間隙依存性は

$$V = Ad^n \quad A: \text{定数} \quad (30)$$

で表わすことができ、Mathes¹⁴⁾ によると $n=0.9$ 、Galand¹⁷⁾、Lehmann¹⁸⁾、Meats¹⁶⁾ などによると、ギャップ長 4mm 位まで $n \approx 1$ 、Fallou¹⁹⁾ などでは $n=10\text{mm}$ までの実験で $n \approx 0.5$ となっている。このようなバラツキの原因の一つとして液体中の浮遊粒子の影響が大きいことを Kok 等は指摘しており、液中で粒子が電界方向に橋絡する条件を導き出し、Table 7 のように、これまでに求められた実験値から、計算で算出した不純物粒子の直径とそれに相当すると考えら

れる不純物の例を示した²⁰⁾。不純物としては、空気は破壊電圧を低下させないが、油は非常に有害で、破壊電圧を著しく低下させるという報告がある²¹⁾。油は真空ポンプなどからも入るので十分注意が必要である。Goldschvartz 等は²²⁾²³⁾、液体ヘリウムの破壊電圧がフィルタリング技術の向上とともに年々上昇してきたことを示している。しかし、最近の特殊フィルタを用いて徹底的に純度をあげた液体ヘリウムでは、かえって低い破壊強度となってしまっており、極く微量含まれる不純物としての酸素の電子親和性の効果などにも注目する必要があるかもしれない。

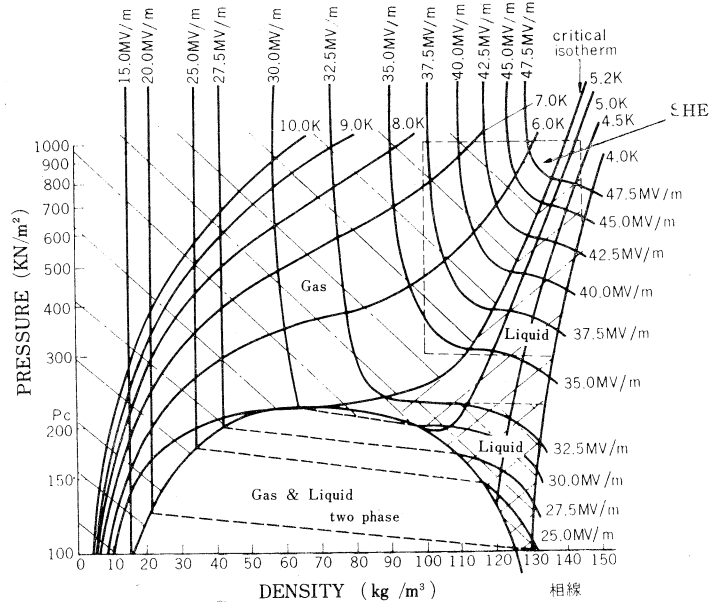


Fig. 8 DC breakdown strength of helium¹⁶⁾

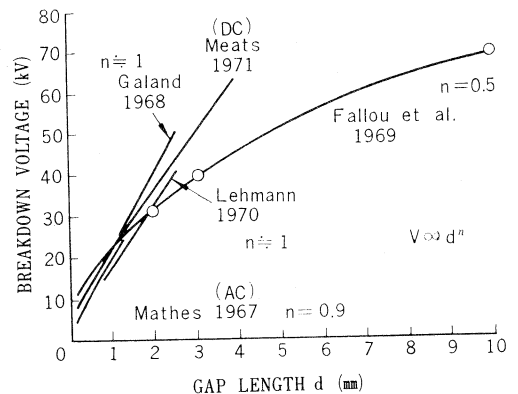


Fig. 9 Boiling helium breakdown as a function of electrode spacing¹⁶⁾

Table 7 DC breakdown strength of liquid He and calculated diameter of impurities in LHe²⁰⁾

Investigator	Year	Electrodes	Liquid	Temp. (K)	ϵ_0	E_0 (kV/mm)	$\frac{2r}{(\text{Calc})}$ Å	Impurities
Blaisse et al	1958	Tungsten Ball-Plate	He	1.3 4.2	1.05 1.05	70 72	3.9 5.9	Cr ₂ O ₃ (?)
Bonk, Edwards	1960	Steel Ball-Plate	He	1.3 4.2	1.05 1.05	100 100	2.9 4.6	Ionized material

電極材料の影響としては陰極材がニオブ、ステンレス、鉛で被覆した銅のときには電極表面が汚損されても破壊電圧にはほとんど影響しないが、銅電極では表面汚損の影響が大きく、洗浄した電極を、ほんの数日間空気に放置しておいても、著しく破壊電圧が低下する。したがって超電導機器、ケーブルの電極には銅を使用しない方がよいという報告もある²¹⁾。

液体ヘリウム中の荷電粒子の状態は奇妙なところがあり、近年の研究の結果、電子に対しては、electron bubble model, 正の粒子に対しては、iceberg model が考えられている。すなわち、パウリの禁制則に由来するヘリウム原子と、余剰電子の強力な反発力と、ヘリウム原子が配向しにくいということにより、液体ヘリウム中に注入された一つの電子は、約 1,000 個のヘリウム原子をおしのけて、球形の真空な空洞の中に存在するのが最も安定な条件となる²⁴⁾²⁵⁾。Fig. 10 に示すように、その直径が 30~40 Å のバブルとなるモデルが考えられている。また正の粒子については、いくつかのヘリウム原子をクラスターとして寄せ集めた直径 10~20 Å 位の球形ボールになると考えられている。

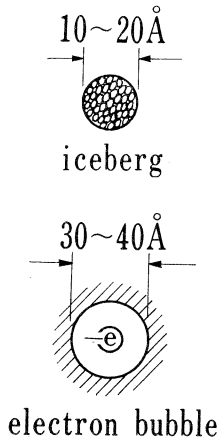


Fig. 10 Charged particle in liquid helium

このため液体ヘリウム中では、荷電粒子の移動度は小さくなる。しかも、Fig. 11 に示すようにバブルを形成する電子の移動度は正の粒子の移動度よりも小さい¹⁵⁾。

液体ヘリウムの絶縁破壊を electron バブルとの関連で明確に説明している研究は見あたらないが、Meats は¹⁶⁾ electron バブルの周囲電界をガウスの法則によって求めてみると、ヘリウムの絶縁破壊電界と同程度になることから、外部から加えた印加電界が破壊電界強度近傍になると、電子バブル中に安定に存在できなくなり、電子なだれを引き起こして絶縁破壊に至ると類推している。

electron バブルとの関係も含め更に液体ヘリウムの絶縁破壊について検討されることが望まれる。

液体ヘリウムの不平等電界（針対平板電極）における破壊のデータを Fig. 12 に示す²⁶⁾。極性効果があり、針電極が正極性の方が負極性の場合より高

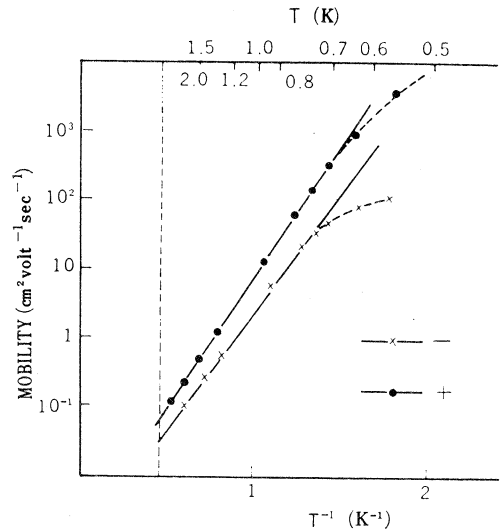


Fig. 11 Mobility of charged particle in liquid helium versus temperature¹²⁾

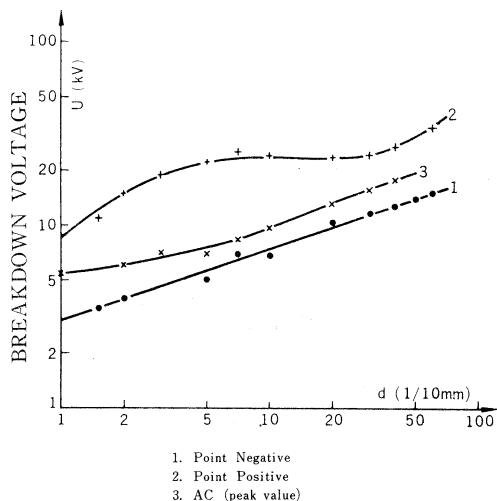


Fig. 12 Breakdown voltage of liquid helium for point-plane electrodes²⁶⁾

い値となっており、交流のピーク値が両者の中間の値になっている。電子とイオンのヘリウム中での移動度の違いとの関連で興味深い結果である。

参 考 文 献

- 1) R. D. McCarty : NBS Report 9762 (1970)
- 2) R. D. McCarty : NBS Technical Note 631 (1972)
- 3) P. J. Giarratano et al : NBS Report 10703 (1971)
- 4) V. Arp et al : NBS Report 10753 (1972)
- 5) J. F. Kerrisk and W. E. Keller : Phys. Rev. 177 (1969) 341
- 6) I. F. Golubev and I. B. Shpagina : Gaz. Prom. 11 (1966) 40
- 7) G. C. Lindauer : BNL 50138 (T-510), (1968)
- 8) H. H. Tjerkstra : Physica 18 (1952) 853
- 9) W. H. Keesom : *Helium* (1942, Elsevier Pub. Co.)
- 10) H. J. M. Hanley and G. E. Childs : Cryogenics 9 (1969) 106
- 11) 日本機械学会編 : 伝熱工学資料, 改訂第2版 (昭41)
- 21) 尾形, 佐藤 : 低温工学 7 (1972) 20
- 13) D. E. Diller et al : Cryogenics 10 (1970) 286
- 14) K. N. Mathes : IEEE. Vol. EI-2, No. 1. (1967)
- 15) B. Fallou, M. Bobo : 1973 NAS Conference E-7 b
- 16) R. J. Meats : Proc. IEE, Vol. 119, No. 6 (June 1972)
- 17) J. Galand : C. R. Acad. Sc. Paris, t, 266 (13 Mai 1968)
- 18) J. P. Lehmann : Revue Générale de l'Électricité (Janvier 1970)
- 19) B. Fallou et al : IIR pp. 201~208 (1969)
- 20) J. A. Kok et al : Appl. Sci. Res. Section B. Vol. 10 (1972)
- 21) J. Gerhold : Cryogenics. (October 1972)
- 22) Goldschvartz, Blaisse : Brit. J. Appl. Phys. (1966)
- 23) Goldschvartz, Blaisse : Conf. Low Temp. (1969)
- 24) W. B. Fowler, Dexter : Physical Rev. Vol. 176, No. 1 (Dec. 1968)
- 25) 伊達 : 固体物理 Vol. 5. No. 9
- 26) B. Fallou, J. Galand : Rev. Générale de l'Électricité 77, 594 (1968)
- 27) 三浦, 岩田 : 第3回電気絶縁材料シンポジウム (1970)
- 28) 野口, 根本, 永井, 比留間 : 放電研究 No. 51
- 29) 岩田 : 古河電工時報 第54号 (1973)