UDC 537.312.62: 621.315.55.011.22
621.3.015.144

論文

54-A 23

超電導安定化材の通電電流に及ぼす影響 について

正 員 野 村 晴 彦 (電総研)

1. はじめに

超電導マグネットなどに応用される超電導線は、通常、常電導金属の安定化材の被覆などによって実用に供されている。安定化材としては、良質な常電導金属が用いられ、中でも無酸素銅 (OFHC) がその主流である。しかし、従来、臨界電流以上の供給電流に対して電圧の発生を緩慢にさせる意味から、主として超電導心線に対する銅材の面積比に対して関心が払われ、逆に安定化材の“質”が臨界電流に及ぼす影響についてはあまり言及されていない。ところが、後述するように、超電導体中の諸損失、発熱および温度上昇を規定するのは、ほかならぬ安定化材の電気伝導および熱伝導の特性であり、結果的には、この特性が超電導電磁石における通電特性を決定的なものにしている。

著者らは、高純度アルミニウムが極低温で示す、電気伝導および熱伝導の特性が、OFHC 銅材に比べ約 1 けたの優れていることに着目し、超電導線の安定化材と超電導体とを一体加工すべく努力を払ってきた。高純度アルミニウムは、周知のように非常に軟らかく、超電導体との硬度差があまりに大きいため、加工過程は少々複雑になるが、技術的には克服され、一体加工に成功し、電磁石化にも成功してきている⁽¹⁾⁽²⁾。この間、技術の向上に伴って、より純度の高いアルミニウムによる安定化も可能になった。この過程の中で、超電導心材、加工度、熱処理および安定化材被覆率の各条件が全く同一でありながら、従来の意味での、いわゆる臨界電流値それ自身が、高純度アルミニウムの純度の高度化につれて著しく向上するのを見た。従来、臨界電流は超電導材料の加工過程により一意的に決定され、安定化材の役割としては磁束跳躍の防止、またはこれを低減させ、無事臨界電流値まで到達させる役割をも

たせ、かつ、その値を超えたときの急激な常電導転移の防止としての位置づけがなされてきた。このことは、安定化材は臨界電流に及ぼしていることを意味するのであるが、従来、臨界電流の定義に安定化材の抵抗率および被覆率の規定は必ずしも必要とされてきていない。これは、銅比によって臨界電流が変わることはないとする仮定に立っており、明らかに矛盾と言えるが、臨界電流を超えた場合、全電流が銅に流れたとしての安定化パラメータ⁽³⁾⁽⁴⁾による安定化の解析も、臨界電流値一定の立場に立っていると考えられる。

本論文では、超電導体に出現する一連の Creep flow の抵抗および急激に飛躍するステップ状の抵抗は、安定化材の電氣的、物理的特性によって著しい影響を受けることを示し、これによって前述の臨界電流値は実用規模において大きく変化することを実験にて明らかにし、更に超電導体が経験する、かかる一連の抵抗状態は、超電導体および安定化材における発熱特性および冷却特性を考慮すれば、理論的にも定常状態の比較的容易な解析で、十分統一的に理解されることを示す。

2. 実験試料

超電導線は合金系超電導体 Nb-Ti (48 wt %) であり、ロッド状の心線 3 本を第 1 図のように、それぞれ OFHC 銅および高純度アルミニウムで、RRR (残留抵抗比) = 600 ± 30 のもの、RRR = $2,000 \pm 100$ のもの、および RRR = $5,000 \pm 250$ のパイプにそう入し、更に外かくを硬化銅のパイプで覆ったものを図のように一体化して線引後、銅を化学的に溶解除去して、第 2 図の写真のようにしたものである。これら四種類の導体は、加工度 [加工前の断面 S_0 、加工後の断面 S_1 とすると $(S_0 - S_1)/S_0$ で表わされる] は 99.98% と各々同一である。その寸法は、安定化材外径が 0.141 mm ϕ 、超電導体の平均径 (第 2 図の写真に見るようにクローバ形をしている) は 0.100 mm ϕ であり、安定化材と超電導体の断面比 (以後、これを k と呼ぶ) が 1:1 になるように設計した。これらの四種類の試料

The Effect on Superconducting Critical Current in Different Stabilizing Metal. By Harehiko Nomura, Member (Electrotechnical Laboratory, Ministry of International Trade and Industry).

野村晴彦：正員，電子技術総合研究所

第 1 図 実験に用いた超電導線の製作法

Fig. 1. Fabricating method of the superconductor.

第 2 図 実験に用いた試料線の断面写真

Fig. 2. Cross sectional picture of the superconductor.

の 9.5 K 近傍での電気抵抗率 ρ_m および熱伝導率 K_m の測定結果は次のようである。

試料名	安定化金属	抵抗率 $\rho_m(\Omega \cdot \text{cm})$	熱伝導度 $K_m(\text{W/cm} \cdot \text{K})$
No. 1	OFHC Cu	3.0×10^{-8}	3
No. 2	99.99% Al	8.67×10^{-9}	10
No. 3	99.999% Al	2.6×10^{-9}	15
No. 4	99.999% Al	1.09×10^{-9}	30

なお、No. 4 のアルミニウム安定化材は 99.999% の Al を、更に高周波精錬したものである。また、各超電導線材は、300°C で 150 時間のアニーリングを施した。このように、安定化材材の質の差を除いては各試料は、全く同条件にて作られており、安定化材材の超電導特性に及ぼす影響が明確になるようにした。

3. 実験方法

各超電導線試料①は、第 3 図のようにベークパイプ②に長さ 500 mm が無誘導に巻かれ、超電導電磁石③によって、磁界がこれに垂直に加わるよう設置される。試料は電流リード④によって通電され、両端は銅ブロック⑤によって試料 70 mm が圧接されている。試料に発生する微小電圧を検出するために、試料中央部に 100 mm の間隔を置いて電圧端子⑥が設けられ、検出された電圧はナノボルトメータ⑦に入れられ、ここで増幅され、XY レコーダ⑧の Y 入力に入る。なお、X 軸は通電電流を示すよう設定する。通電電流は、

第 3 図 実験試料と装置の接続図

Fig. 3. The combination of specimen and experimental instrument.

試料が熱的に平衡状態になるように 1 A/s で上昇するようにした。なお、ここで試料の出力端子とレコーダの間にナノボルトメータを介在させたのは、一つは検出電圧は非常に雑音に弱く、レコーダ内蔵の増幅器だけで利得は限られており、感度の高い測定ができにくいので、利得を両者に分割させるためである。もう一つの理由は、XY レコーダの感度を同一条件にしておいて、ナノボルトメータの感度レンジ (10 nVf·s → 10 mVf·s) を大きくとりたいためである。

4. 実験

各試料 (No. 1 ~ No. 4) の $H-I_c$ 特性を計測するのであるが、従来、超電導の抵抗出現による電圧を検出するのに、通電電流を増加していった XY レコーダ上において X 軸 (電流軸) に平行なところから、Y 軸に立上りを示す電流を I_c としている。この際、レコーダ上に微小電圧がそれと判別できれば十分とされている。これはあくまで I_c 一定の考え方があるからで、通常 50 ~ 100 $\mu\text{V/cm}$ で測定されているようである。当実験においては、ナノボルトメータで測定感度をフルスケールを順次 20 mV, 2 mV, 200 μV , 20 μV と変化させて、それぞれの試料の $H-I_c$ 特性をとったものを各々第 4 図 ~ 第 7 図に示す。この場合の I_c の基準として、それぞれ XY レコーダ上に電圧が 500, 50, 5, 0.5 $\mu\text{V/cm}$ に達したところの電流を I_c とした場合である。この結果から理解されるが、 I_c (ここでは前述の基準で定義したもの) は、第 4 図の場合 (通常このレンジで測定されている) 試料 No. 1 ~ No. 4 の間に非常に大きな差がみられる。特に No. 4 と No. 1 との間には 2.9 倍もの I_c の違いとなって現象している。感度を上げるに従って、この差は縮まる傾向をみせ、第 7 図では 1.9 倍になっている。しかし、依然として安定化材の影響は、ここでも大きく効いていることがわかる。これらの傾向を明確にするために、磁界 3.0 T における各々の電圧感度と規定臨界

第4図 電圧 0.5mV のところを I_c とした $H-I_c$ 関係図

Fig. 4. $H-I_c$ relation (when I_c is defined by the voltage appearance of 0.5mV).

第5図 電圧 50μV のところを I_c とした $H-I_c$ 関係図

Fig. 5. $H-I_c$ relation (when I_c is defined by the voltage appearance of 50μV)

第6図 電圧 5μV のところを I_c とした $H-I_c$ 関係図

Fig. 6. $H-I_c$ relation (when I_c is defined by the voltage appearance of 5μV)

電流との関係を第8図に示す。これらの事実、測定感度によって、いわゆる I_c の値が異なることを表わしており、かつ、安定化材の金属の質(電気・熱伝導)の差によっても大きく、 I_c が異なることを示している。この意味において、今後、超電導磁石を設計する場合の臨界電流は電圧感度だけでなく、安定化材の特

第7図 電圧 0.5μV のところを I_c とした $H-I_c$ 関係図

Fig. 7. $H-I_c$ relation (when I_c is defined by the voltage appearance of 0.5μV)

第8図 通電電流と各感度(電圧)における I_c

Fig. 8. Defined I_c and voltage sensitivity.

第9図 通電電流と合成抵抗の関係

Fig. 9. The relation between transport current and combined resistivity.

性(電気・熱伝導)および被覆率を明記して規定したうえで、臨界電流値を定義する必要があると考えられる。第8図から、超電導体と安定化材の合成抵抗が容易に導かれ、第9図に示す興味ある結果が得られる。すなわち、合成抵抗は安定化材の電気抵抗率のそれぞれの差異に対して非常に大きく影響を受けていることがわかる。しかも、この合成抵抗は電流または電流密度に対する関数であることが知られる。

5. 理論的検討

〈5・1〉 超電導体と安定化材の合成抵抗 実験結果からわかることは、各超電導体は規定電圧に達する以前から微小ではあるが、抵抗が発生しており、かつ、抵抗発生自身、安定化材によって著しい影響を受けていることがわかった。これは安定化材の電気抵抗率の違いによって、現象的には臨界電流が相当異なって観測されることになる。これは安定化材によって重要な意義を持たしめる意味において、従来にない概念を含んでいる。ここでは、この点について更に理解を深めたい。規定臨界電流以前に超電導線に微小なりとも電圧を発生している以上、定常的にある程度磁束が流れていることになる。この磁束の移動は速度 v_L に逆向きに粘性力（粘性係数を η とする）を受け、これはローレンツ力 f_L と平衡しており次の関係にある。

$$f_L = \eta v_L \dots\dots\dots (1)$$

この粘性力と移動速度の積は、次式のように損失パワー P を与え、超電導体内の温度を上げる。

$$P = f_L \cdot v_L = (B_z \cdot v_L) \cdot J \dots\dots\dots (2)$$

従って、電界 E が通電方向に発生し、

$$E = B_z \cdot v_L \dots\dots\dots (3)$$

この電界を通電電流密度で除したものは、超電導線全体の合成抵抗率 ρ^* を示し、これは当然ながら超電導体の抵抗率 ρ_s と、安定化材の ρ_m とから合成されている。(1)式を考慮に入れて、次式ようになる。

$$\rho^* = E/J = B_z^2/\eta \dots\dots\dots (4)$$

すなわち、粘性係数と合成抵抗率は反比例の関係にあって、損失パワー密度を与える式は、 ρ^* を使って次式によって表わされる。

$$P = \rho^* \cdot (f_L^2/B_z^2) \dots\dots\dots (5)$$

すなわち、発熱のパワは合成抵抗率 ρ^* に比例していることが理解される。

当実験に用いた各超電導線は、超電導体と安定化材の面積を相等しく設計してあるので、 ρ^* は、

$$\rho^* = 2 \rho_s \rho_m / (\rho_s + \rho_m) \dots\dots\dots (6)$$

で表わされる。それぞれの試料における合成抵抗は、超電導体の抵抗率 ρ_s の変化によってどのようになるかを第10図に示す。安定化材の抵抗率 ρ_m の違いが合成抵抗率 ρ^* へ反映し、(5)式で示したように、これが超電導線の発熱の違いとなって通電特性を大きく規制する素因になる。ここで問題になるのが、超電導体の抵抗率 ρ_s である。 ρ_s は通電電流、磁界および温度によって $0 < \rho_s \leq \rho_n$ (超電導心線の遷移温度以上の場合の抵抗率) の非常に広範囲な値である。

第10図 超電導体の抵抗率変化に伴う各試料の合成抵抗

Fig. 10. Combined resistivity in accordance with the change of resistivity of superconductor.

Kim 氏ら⁽⁵⁾によれば、クリープ状態における超電導体中に出現する電界 E は、次式のように表わされている。

$$E = f \exp\{(-F_0 - qJ(B+B_0))/kT\} \dots\dots\dots (7)$$

ただし、ここで f , F_0 , q などは超電導体固有の特性によって決定されるとしている。また、(7)式を電流密度で微分したものが ρ_s であり、

$$\rho_s = \partial E / \partial J = -q(B+B_0)E/(kT) \dots\dots (8)$$

なる非線形な量であり、磁界および温度の関数でもあり、従って冷却条件に大きく左右され、発生電圧そのものの関数であるので、実際は ρ_s は非常に複雑なものとなる。ここでは、あらかじめ技術的観点に立って ρ_s は $0 < \rho_s < 10^{-5} (\Omega \cdot \text{cm})$ の範囲で動くと考え、安定化材の抵抗率 ρ_m 、冷媒への伝熱条件など、いかなる ρ_s が出現しやすいのか、また、その場合の熱条件はどうなのか? を中心に述べる。そのため、今後は超電導体中の抵抗率はそのままパラメータ ρ_s とする。

〈5・2〉 超電導体内と安定化材中の発熱 前項において、超電導体と安定化材の合成抵抗によって、超電導の損失が決定づけられるのをみた。これを足がかりに、超電導体内と安定化材中のそれぞれの発熱特性を述べたい。

合成抵抗が現われているときは、当然ながら超電導体と安定化材に全電流は分流する。分流率は両者の各発熱パワーの和を極小にするように分かれ、これは並列回路における分流と全く同じ結果を導く。ここで超電導体内および安定化材中での発熱パワー密度を、それぞれ Q_s , $Q_m (\text{W/cm}^3)$ とすると、次式のように簡単に表わされる。

$$Q_s = \{\rho_m / (\rho_s + \rho_m)\}^2 I^2 \cdot \rho_s / A_s^2 \\ = \{\rho_m^2 \rho_s / (\rho_s + \rho_m)^2\} J^2 \dots\dots\dots (9)$$

第 11 図 超電導体の抵抗率変化に伴う各試料の超電導体内の発熱密度
Fig. 11. Loss power density in the superconductor in accordance with the change of resistivity of the superconductor.

第 12 図 超電導体の抵抗率変化に伴う各試料の安定化材中の発熱密度
Fig. 12. Loss power density in the matrix in accordance with the change of resistivity of the superconductor.

第 13 図 各試料安定化材における磁気抵抗効果
Fig. 13. Magneto-resistance effect for each sample.

$$Q_m = \{\rho_s / (\rho_s + \rho_m)\}^2 I^2 \rho_m / A_m^2 \\ = \{\rho_s^2 \rho_m / (\rho_s + \rho_m)^2\} J^2 \dots \dots \dots (10)$$

ただし、 A_s 、 A_m は超電導体と安定化材の各断面面積である。 $J=10^5 \text{ A/cm}^2$ としたとき、No. 1～No. 4 の試料の違いによって超電導体の抵抗率 ρ_s の変化に応じて、 Q_s 、 Q_m の値が異なる様子をそれぞれ第 11 図および第 12 図に示す。

これらの図は、安定化材の抵抗率が著しく各発熱に影響を与えているかがわかる。同じ ρ_s でありながら、安定化材の抵抗率の大小が超電導体内および安定化材中の名発熱に直接反映している。また (9) 式から $\partial Q_s / \partial \rho_s = 0$ によって得られるが、第 11 図から超電導体内の Q_s は $\rho_s = \rho_m$ になったときに極大になり、その後 ρ_s が増加すると Q_s は逆に下降する。一方、第 12 図から Q_m は、 ρ_s が比較的小さいときは ρ_s の 2 乗に比例し、 ρ_s が増加するにつれ Q_m は ρ_m の大小に対応した一定値になる。なお、 $\rho_s = \rho_m$ のときに Q_s と Q_m は同じ発熱密度であり、 $\rho_s > \rho_m$ になるにつれ $Q_s < Q_m$ となる。このように、超電導体内の Q_s は安定化材の抵抗率 ρ_m によって規定されており、 $Q_s(\text{max}) = \rho_m J^2 / 4$ にて与えられる。いうまでもなく、ここで言う ρ_m は実磁界中での安定化材の抵抗率であり、各試料の抵抗率 (No. 1～No. 4) は、それぞれ磁界中では第 13 図のように変化するので、No. 1 のような銅材では磁界による抵抗の増加が著しく、No. 2～No. 4 のような高純度アルミニウム材では、飽和傾向がみられるので、高純度アルミニウムの安定化材は、特に高磁界において非常に有効であると言える。

〈5・3〉 超電導線内の温度上昇と安定化材 前項における超電導体内の発熱と安定化材の発熱は、液体ヘリウムへの伝熱によって冷却されている。超電導線の軸心から半径方向だけの定常熱伝導を考えると、その熱伝導方程式は半径から r のところで、

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dT}{dr} \right) = -\frac{Q_s}{K_s} \dots \dots \dots (11)$$

ここで、 K_s は超電導の熱伝導率である。超電導体と安定化材の接触面の熱の連続性によって、 r_s を超電導体の半径とし、

$$\pi r_s^2 Q_s = 2\pi r_s \cdot q \dots \dots \dots (12)$$

$$K_s (\partial T / \partial r)_{r=r_s} + q = 0 \dots \dots \dots (13)$$

ここで、 q は超電導から安定化材へ伝達されている熱束 (W/cm^2) である。これらの境界条件で方程式を解けば、超電導体内の温度分布 T は、 T_m を超電導体に接した安定化材の温度として次式のようにになる。

$$T - T_m = \frac{r_s^2 Q_s}{4 K_s} \left(1 - \frac{r^2}{r_s^2} \right) = \frac{r_s^2 \rho_m^2 \rho_s}{4 K_s (\rho_s + \rho_m)} \\ \times J^2 (1 - r^2 / r_s^2) \dots \dots \dots (14)$$

次に、安定化材中の分流通電による発熱 Q_m による温度上昇であるが、安定化材中の熱伝導率 K_m は超電導体より約 3 けた大きいので、安定化材中の温度上昇は従来無視されてきたが、 Q_m の値も ρ_s が大きくなると Q_s に比較して 2～3 けた大きくなるので、一応注意を払う必要がある。すなわち、安定化母材中での熱伝導方程式は、(11) 式とほぼ同様に以下によって与えられる。

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dT}{dr} \right) = -\frac{Q_m}{K_m} \dots\dots\dots (15)$$

ここで、 K_m は安定化材の熱伝導率である。 $r=r_s$ のところでは、超電導体からの発熱 Q_s が安定化材へと流れ込んでおり、これらの境界条件は

$$\begin{aligned} -K_s \frac{dT}{dr} \Big|_{r=r_s-0} &= -K_m \frac{dT}{dr} \Big|_{r=r_s+0} \\ &= q = r_s Q_s / 2 \dots\dots\dots (16) \end{aligned}$$

であり、これを考慮して(15)式を解けば、安定化材の最内部の温度 T_m は次式にて与えられる。

$$\begin{aligned} T_m = \frac{Q_m}{4K_m} (r_0^2 - r_s^2) + \frac{r_s^2}{2K_m} (Q_s - Q_m) \ln \left(\frac{r_0}{r_s} \right) \\ \dots\dots\dots (17) \end{aligned}$$

ここで、 r_0 は安定化材の半径を示す。これらの発熱は液体ヘリウムへ伝熱されるので、安定化材表面の温度を T 、液体ヘリウムの温度 T_b とし、液体ヘリウムへの熱伝達係数を h (W/cm²・K) とすれば、次の熱伝達関係がある。

$$\begin{aligned} \pi r_s^2 Q_s + \pi (r_0^2 - r_s^2) Q_m \\ = h (2\pi r_0) (T - T_b) \dots\dots\dots (18) \end{aligned}$$

超電導体中の温度上昇 ΔT は、(14)、(17)式および(18)式による温度の上昇分を加算したものであるので、これは液体ヘリウムと心線中央部との温度差を与え、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \Delta T = T - T_b \\ = \frac{r_s^2 Q_s}{4K_s} + \frac{Q_m}{4K_m} (r_0^2 - r_s^2) + \frac{r_s^2}{2} \left(\frac{Q_s}{K_s} - \frac{Q_m}{K_m} \right) \\ \times \ln \left(\frac{r_0}{r_s} \right) + \frac{r_s^2 Q_s + (r_0^2 - r_s^2) Q_m}{2hr_0} \dots\dots (19) \end{aligned}$$

理解を容易にするために、(19)式の第1項を ΔT_1 、第2項を ΔT_2 、第3項を ΔT_3 、第4項を ΔT_4 と温度上昇を分けて検討してみる。試みに、電流密度 $J = 10^5$ (A/cm²)、超電導体の熱伝導率を

$$\begin{aligned} K_s = 1.5 \times 10^{-3} \text{ W/cm} \cdot \text{K} \\ (4.2 \sim 9.0 \text{ K 間の実測平均値}) \end{aligned}$$

としたとき、各試料のそれぞれの温度上昇を、 ΔT_1 は第14図に、 ΔT_3 は第15図に、 ΔT_4 を第16図に掲げる。

ΔT_2 は No.1 の試料でも高々 2.5×10^{-3} 度以下の寄与しかなく、No.4 の試料に至っては 9.0×10^{-6} 度と無視して差支えない。すなわち、安定化材中での温度分布は、無視できるとする従来の見方の一面は正しい。しかし温度分布を無視できるということは、その部分の発熱を考えなくてもよいということでは決してない。すなわち、(19)式からわかるように Q_m は第2

第14図 超電導抵抗率変化と温度上昇 ΔT_1 の関係
Fig. 14. The relation between ΔT_1 and the change of resistivity of the superconductor.

第15図 超電導抵抗率変化と温度上昇 ΔT_3 の関係

Fig. 15. The relation between ΔT_3 and the change of resistivity of the superconductor.

項の ΔT_2 だけでなく、 ΔT_3 および ΔT_4 の項にも現われており、むしろ、これらの影響の方が大きいからである。これを第14図～第16図にも示すように、超電導心線中央部の温度上昇分を与える ΔT_1 は、前項で述べた Q_s 値そのものが、安定化材の抵抗率 ρ_m の影響を著しく受け、その結果が超電導心線の温度上昇に直接反映している。 ΔT_3 は、その形はほぼ ΔT_1 と同様の形状の変化をなし、当実験の試料においては温度上昇 ΔT_3 は $\Delta T_3 \cong \Delta T_1 / 3$ の寄与をしているが、ここでも安定化材抵抗率 ρ_m の影響を相当量受けていることに変わりはない。

次の ΔT_4 に関しても、熱の伝達に伴う安定化材の表面の液体ヘリウムなどの冷媒に対する温度ギャップであるが、伝熱表面では超電導体の発熱と安定化材中の発熱の総量において効くため、第16図のように試料の電気抵抗率の違いが、温度上昇 ΔT_4 の違いとなって効いてくるわけである。この試算の場合は、

第 16 図 超電導抵抗率変化と温度上昇 ΔT_4 の関係

Fig. 16. The relation between ΔT_4 and the change of resistivity of the superconductor.

第 17 図 超電導抵抗率変化と全温度上昇 ΔT の関係

Fig. 17. The relation between total temperature rise ΔT and resistivity of the superconductor.

熱伝達係数を $0.5 \text{ W/cm}^2 \cdot \text{K}$ にしたが、特に温度上昇 ΔT_4 に関しては、安定化材の抵抗だけでなく、熱伝達によっても変わる量なので後項に再び検討する。

超電導心線中心部の温度上昇は、(19)式から導かれるように、以上の温度上昇分の合算にて得られ、結果は第 17 図に示す。この温度上昇 ΔT は、超電導体の抵抗率の変化に伴い矢印 P 点で緩慢であるが、極値をとっている。この極値の物理的意味は、この P 点を与える抵抗率を $[\rho_s]$ とすると、 $\rho_s < [\rho_s]$ では超電導体から安定化材へ熱が流れており、すなわち、超電導線の温度上昇 > 安定化材の温度上昇であり、 $\rho_s = [\rho_s]$ では超電導体と安定化材とは等温度上昇で平衡しており、 $\rho_s > [\rho_s]$ では安定化材の温度上昇の方が高いため、超電導線の温度は安定化材の温度によって支配される。ここでも安定化材の良否は、このように心線の温度上昇および超電導体の到達抵抗率に決定的に

第 18 図 液体ヘリウムの熱伝達係数と温度差測定図

Fig. 18. Heat transfer coefficient to liquid He.

(この場合、超電導抵抗率自身も飛躍する)

第 19 図 No.1 試料における熱伝達条件変化時の温度飛躍を与える超電導抵抗率

Fig. 19. Take off characteristics of the resistivity and temperature rise in No. 1 sample.

影響を与える。

以上の経過から、従来、安定化材内の温度分布は無視できることから、安定化材の超電導体への熱的寄与は過少評価されてきたといえる。

〈5.4〉 超電導線の抵抗の跳躍 ここでは、液体ヘリウムへの伝熱関係と安定化材の関係を述べる。第 18 図は液体ヘリウムの熱伝達係数の実測図である。このように液体ヘリウムへは熱伝達率の限界があり、この限界が超電導体と安定化材の相互にどんな影響を及ぼすかを検討する。ここで、前項の各安定化材の表面温度を与える ΔT_4 と、熱伝達係数 h との関係を示したものが第 19 図および第 20 図である。この矢印の意味は、表面が h によって与えられる熱伝達係数をとる場合、超電導体の抵抗率がここに至ると急激に温度が上昇し、当然ながら超電導の抵抗が跳躍する点でもある。

第 19 図は No.1 の試料についての $\rho_m = 3.0 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{cm}$ の銅材であり、第 20 図は No. 3 の $\rho_m = 2.6 \times 10^{-9} \Omega \cdot \text{cm}$ の高純度アルミ材について、各飛躍点を

(この場合、超電導抵抗自身も飛躍する)

第 20 図 No. 3 試料における熱伝達条件変化時の温度飛躍を与える超電導抵抗率

Fig. 20. Take off characteristics of the resistivity and temperature rise in No. 3 sample.

(矢印のところで温度・抵抗が飛ぶ)

第 21 図 No. 1 試料における超電導体の抵抗率と全温度上昇

Fig. 21. The take off resistivity and total temperature rise in No. 1 sample.

(矢印のところで温度・抵抗が飛ぶ)

第 22 図 No. 3 試料における超電導体の抵抗率と全温度上昇

Fig. 22. The take off resistivity and total temperature rise in No. 3 sample.

与える。 $h=0.1$, $h=0.2$ では、両者にあまり差異を生じてないが、 $h>0.3$ 程度になると著しく効いてくることがわかる。すなわち、 $h>0.3$ では後者はもはや飛躍は起こらない。表面温度の飛躍は直ちに心線の温度上昇を誘導する。心線の温度上昇の飛躍を記し

たものが、前者については第 21 図であり、後者においては第 22 図となる。このように、低抵抗率の安定化材は超電導線の温度および抵抗の飛躍を低減するのに、極めて効果的であることがここでも明確となる。

6. む す び

著者らは高純度アルミニウムによる超電導線の安定化を考え、その開発に従事してきた。この開発中、一番不思議に思ったのが、 I_c そのものがアルミニウムの純度に非常に大きく依存することであった。この疑問を解く中で、次のことが明らかになった。

(1) 超電導線の安定化には、従来、従的存在として考えられてきたが、安定化材の役割は決定的な役割を演ずることがわかった。特に、現象的には臨界電流値に大きな変化を与える。これは電圧感度にはよらない。

(2) 臨界電流値は超電導磁石を設計する場合、重要ではあるが、測定感度電圧を規定するだけでなく、安定化の抵抗率および面積率を測定しなければ決定されない。

(3) 超電導線において超電導の抵抗の出方は安定化材の抵抗率より、ほぼ 1 けた半前から影響し始め、その後の通電特性を決める。

(4) 安定化材に電流が分流している場合は、発熱パワ密度は決して無視できない。これは超電導の抵抗率が、安定化材よりはるかに小さい抵抗率のところで顕著である。

(5) 液体ヘリウムとの熱伝導関係を考慮した場合も、温度跳躍、抵抗跳躍を抑制するのに高電導安定化材、特に高純度アルミニウム安定化材の効果は大きい。

本研究を進めるにあたり、当研究所エネルギー部長等々力 達博士、および超電導研究室長 小山健一博士を始め、研究室諸兄の活発な討論、激励を受けたことを感謝します。なお、高純度アルミニウムの安定化線の作成などにあたっては、東京特殊電線(株)の寺尾計彦氏の御協力に負うところが多く、ここに感謝の意を表わす次第です。

(昭和 53 年 7 月 26 日受付, 同 53 年 11 月 29 日再受付)

文 献

- (1) H. Nomura, et al.: *Cryogenic*, **11**, 5, 396 (1971-8)
- (2) H. Nomura & S. Shimamoto: U.S.-Patent, No. 300345
- (3) Z.J.J. Steckly: *IEEE Trans. Mag.* **MAG-2**, 319 (1966)
- (4) Z.J.J. Steckly: *J. Appl. Phys.* **37**, 324 (1966)
- (5) Y.B. Kim, et al.: *Phys. Rev.*, **131**, 2486 (1963-9)