Ⅲ-6. 超電導体の臨界特性と交流損失の評価

片 桐 一 宗, 大 松 一 也*

岩手大学工学部機械工学科 盛岡市上田 4-3-5

* 住友電気工業㈱大阪研究所 大阪市此花区島屋 1-1-3

(1991年10月17日受理)

Evaluation of Critical Parameters and AC Loss in Superconductors

Kazumune KATAGIRI and Kazuya OHMATSU*

Faculty of Engineering, Iwate University, 4-3-5 Ueda, Morioka 020

* Osaka Research Laboratories, Sumitomo Electric Industries, Ltd., 1-1-3 Shimaya, Konohana-ku, Osaka 554

(Received October 17, 1991)

Synopsis:

Procedures to measure critical parameters such as the critical temperature, T_c , the upper critical field, H_{c2} , the critical current, I_c , and the AC loss in practical superconductors are described. The criteria and factors which influence the evaluation of the parameters are briefly discussed. The importance of the holder in the 4 probe method which supports the sample against the Lorentz force is emphasized from the view point of strain effect. The magnetization method to measure the AC loss of a multifilamentary wire is described in detail.

1. はじめに

超電導転移に伴って変化する電気, 磁気的特性を利用して臨界温度, 臨界磁界が四端子(抵抗)法, 交流帯磁率法などにより測定される。複合多芯実用線材の四端子法による臨界電流測定においては磁束流に関連した因子のほかに, current transfer 歪効果などに起因する誤差や基準の選択に注意する必要がある。

臨界特性と並んで実用上重要な線材特性である交流損失測定について, 一般的な磁化法, 熱量法などについて概説するとともに, 複合多芯線材の磁化測定による評価法について原理, 装置のほか測定例をあげて詳しく述べる。

2. 臨界温度 T_c , 臨界磁界 H_{c2}

T_c および H_{c2} の測定には後で述べる臨界電流 I_c の測定と同様に四端子法による直流抵抗測定が一般的に用いられる。超電導状態から常電導状態への遷移は通常温度幅を持って起こるので, 抵抗値の遷移幅 R_n の中点の温度で定義される T_c に遷移幅 $\Delta T = T_{3/4, Rn} -$

$T_{1/4, Rn}$ を付記する。酸化物超電導体の場合には, 超電導開始時の $T_c(\text{onset})$ と, 完全に超電導になる $T_c(\text{zero})$ なども用いる。4.2 K 付近の極低温下では試料および温度計の熱容量は極度に小さいのでジュール熱(通電電流値 $< 20 \text{ A/cm}^2$) および熱侵入を減らすと同時に温度変化の速度を小さく ($< 0.5 \text{ K/min}$), また, 熱伝導度の良い金属ブロックに取り付けて温度分布を均一にすることが重要である。また検出電圧が低いため熱起電力にも注意を払う必要がある。この方法では材料が異なる T_c を持つ複数の相からなる場合, 最も高い T_c を持つ相が連なると試料内に常電導部が残っていても遷移が完了したように見えるため遷移曲線は一般に鋭い。

検出コイル中の試料の常磁性から反磁性への磁化の変化をインダクタンスのそれとして捕える T_c 測定法では各相それぞれの T_c および体積分率に関連した遷移が検出できるので, より詳細な T_c の評価ができる。とくに線状に加工できない粉末試料などに対しても利用できるが, 体積分率の見積りについては, 試料内の超電導相で囲まれた部分が遮蔽される現象があ

Fig. 1 Electrical systems for critical current measurement.³⁾

り、注意が必要である。この交流帯磁率測定を用いた T_c の評価には今のところ抵抗法の場合のような基準がないこと、磁場振幅や測定周波数に測定値が依存することなど、とくにフィラメントの細い線で問題点が残されている。

H_{c2} の値が通常の磁石設備の定常磁界に比べて高い場合、パルス磁界が使用される。この場合、パルス磁界の立ち上がり時間に H_{c2} が影響され、通常これが 10 ms 以上でないとい一定の H_{c2} が得られないが、線径の細い場合はより短いものでも可能であることが知られている。実用的には Kramer 則¹⁾を用いて H_{c2} よりも低磁界における I_c と磁界の関係から得られる外挿値としての H_{c2} を求めることも多い。

3. 臨界電流 I_c

一定温度、たとえば 1 気圧の液体 He 中で外部磁界の関数として求められる I_c は、ふつう四端子法を用いて定常磁界中で測定される²⁻⁴⁾。代表的な測定系を Fig. 1 に示す。パルス磁界中での測定法確立の努力も続けられているが、大電流の領域では定常磁界で得られるものと比べ大幅に低い値が得られる。四端子法に

Fig. 2 The current-voltage characteristic of a practical superconductor with electric field, resistivity, and power criteria for critical current.⁵⁾ (A and l are cross sectional area and voltage tap spacing of the conductor, respectively.)

より得られる $V-I$ 特性は Fig. 2 の実線のようになる⁵⁾。本来、ローレンツ力がピン止め力に打ち勝って生じる磁束流に由来する I_c は、実用超電導線材では種々の因子の影響を受けて定まる。Fig. 2 に示されているように、 I_c の基準として、1) 電圧（一般には $10^{-6} \sim 10^{-7}$ V/cm の範囲で定義されている）、2) 比抵抗 ($10^{-11} \sim 10^{-12}$ $\Omega \cdot \text{cm}$) などが主に用いられている。電流端子から線材の超電導フィラメントへの current transfer には、ある一定以上の長さ⁶⁾が必要である。試料が短く電流端子と電圧端子との距離が短い場合、あるいは線材のシースやマトリックスの抵抗が高い場合などには current transfer^{6,7)}による電圧（通電初期から発生し、電流に比例する）が生じ、これを除く補正が必要である。一方、比抵抗基準ではたとえば Nb_3Sn 線材の臨界電流密度算定の場合と同様に、断面積として 1) 線材全体 (overall)、2) 安定化銅を除いた複合部 (非銅)、あるいは 3) 生成した超電導 Nb_3Sn 層 (net) のいずれを取るかによって異なった結果となるが、2)、3) では占積率の測定の問題がある。

Fig. 3 は通常用いられる試料ホルダーと外部磁場の組合せを示す³⁾。試料の形状寸法によって I_c の測定、評価に差異が生じる。試料の電流端子取り付け部の発熱、current transfer、高感度の I_c の基準電圧の可否など Table 1³⁾ に示すような長・短所がある。たとえば、試料形状によって $V-I$ 関係は Fig. 4³⁾ のように変

Fig. 3 Common sample holder and configurations used for critical current determination.³⁾

化し、したがって基準電圧との組合せによって I_c は著しく変化することになる。この種の基準電圧の I_c 評価への影響は Nb₃Sn 導体に比べ NbTi 導体では約 1/2 程度であることも知られている。

磁界に直交する通電による通常の I_c 測定では線材に加わるローレンツ力を支持することが不可欠である

Fig. 4 Representative V-I characteristics (multifilamentary Nb₃Sn at 7 T) for different sample holders.³⁾

が、歪に伴う特性変化の著しい化合物系線材の測定では、試料ホルダー材質が I_c に大きな影響を及ぼす。

Table 1 Sample holder comparisons.³⁾

Sample geometry	Advantages	Disadvantages
Short straight	Simple geometry Solenoidal magnet	High contact heating High current transfer Insensitive criteria
Long straight	Low contact heating Moderate criteria Simple geometry	Some current transfer Split-pair magnet
Hairpin	Low contact heating Moderate criteria Solenoidal magnet	Some current transfer Moderate geometry
Coil	Low contact heating Low current transfer Sensitive criteria Solenoidal magnet	Complicated geometry

Fig. 5 Illustration of fiberglass-epoxy geometries.¹¹⁾

一般的な材質としてフェノール系のベークライトとエポキシ系のガラス繊維強化樹脂が用いられているが、とくに前者にはこれから述べるような問題があるのでその使用は望ましくない。直線状の試料では NEMA 規格 G10, G11, その他 G クラスの FRP の布面に平行に試料を取り付ければ、室温から測定温度 (4.2K) への冷却による通常の線材と試料ホルダーとの熱収縮量が適合するため、正しい I_c の評価の可能なことが示されている^{8,9)}。なお、G10 の場合でも布積層方向⁹⁾、丸棒 (rolled) から削り出した試料ホルダー¹⁰⁾、さらに細かくいえば、ガラス布の繊維数、充填材によっては 10% 程度の I_c の誤差の生じうること、またホルダー材質が不適合なものの場合、試料をホルダーにグリースで固定すると I_c の変化がとくに著しいことなどが知られている。コイル状試料の場合も G10, G11 相当の plate tube もしくは厚さと半径の比の小さい rolled tube の使用が推奨されている (Fig. 5)¹¹⁾。

臨界電流の歪効果についてはその測定法が確立されてきている。比較的長い (15cm 程度) 真直状試料を装着したホルダーを冷却時に試料に歪を加えないよう配慮しつつスプリットペア磁石中の十分均一な磁界に挿入し、4.2 K で較正されたクリップゲージを用いた高精度歪測定とともに負荷中の I_c 測定を行えば、かなり信頼性の高い結果が得られる。15T 以上の高磁界中の測定には印加磁界と試料電流の方向が直交するようにボア内で水平方向に収まるまっすぐな短い試料を使うのが一般的である。Fig. 6 はそのような測定のための装置の一例で、これにより得られた 3 種類の VAMAS (後述) 試料についての測定結果 (Fig. 7 実線) は、同じ試料についての他の測定値とかなりよく一致している。また、Fig. 7 は数種の金属、化合物の複合体からなる典型的な Nb₃Sn 実用線材では製造熱処理温度から測定温度 (4.2K) までの冷却によって、

その Nb₃Sn 層に加わる熱歪が 0.2~0.3% 程度であることや、 I_c の歪による劣化の程度が線材によって著しく異なることなどを示している。利用可能な高磁界磁石は国内外で増えつつあるが限られているので、低磁界における I_c -歪関係のデータと高磁界までの零歪における I_c の磁界依存性のデータから歪スケール則¹²⁾を用いて高磁界における I_c の歪依存性を推定するのも一つの方法である。

試料軸が磁界垂直方向となす角度が 90° から遠ざかるに従って磁束流は起こりにくくなるので I_c は増加する。 I_c 測定に及ぼす他の影響因子として電源に由来するリップル、磁界の均一性と変動、圧力の変化に伴う温度のふらつきなどがある。これらの因子およびこれまで述べてきた諸因子の I_c 測定値に及ぼす影響の程度が整理されている⁹⁾。また大容量 (>600A) 導体では、付加的な因子として導体内での複雑な歪分布、局所的な線材の動き、大きな自己磁界、磁束流による複雑な電場などが I_c 評価の問題として加わるものと考えられる。

テープ材でとくに低磁界の場合のように I_c が非常に大きい場合には遮蔽電流に注目した磁化測定法が用いられる。酸化物超電導体のように磁界による結晶粒界での超電導破壊の著しい材料における粒内での臨界電流 (密度) を評価するためにこの磁化測定法が用いられるが、この場合には当然ながら四端子法で求められる輸送電流の臨界値としての I_c とは異なることはよく知られている (臨界電流密度の測定については文献 13) を参照されたい)。

臨界電流測定における V - I 関係は Fig. 2 に見られるように経験的に $V \propto I^n$ で表され、超電導-常電導遷移の鋭さを示す n 値は I_c の電圧基準のとりかたと関係するため注目されている。 n 値は磁界の増加とともに減少するが、低磁界では n 値算定の電圧範囲によ

Fig. 6 Sample holder for I_c vs. strain measurement at high fields.

て大きく異なる。

これまで述べてきたように超電導線材の特性は測定条件や I_c の基準によって著しく変化する。超電導材料開発や流通の合理化のためには、特性評価の標準化が要求されている⁴⁾。現在、次の二つの方法が確立され国際的にも認められている。

1) NBS-ASTMにより測定法の標準として、ASTM B 714-82 (Definition of Terms) および B 714-83 (Standard Testing Method) が定められ、その準拠が推奨されている。

2) 標準試料が NBS で作製され配布可能であり、これによって装置の精度のチェックやその維持が可能となっている。

さらに VAMAS (Versailles Project on Advanced

Materials and Standards) の一環として Nb₃Sn 試料を交換して日米欧関連研究機関での I_c 測定を行うプロジェクトが進められている。測定上の細かい仕様（試料諸元、測定設備、条件など）を付した共同研究の成果として I_c のばらつきに測定ホルダー材質、線材の固定法、線材に作用するローレンツ力の方向など、主として歪効果の要因が問題となると報告されている¹⁴⁾。

4. 交流損失

4.1 磁化法

磁化曲線から交流損失を求めるためには、与えられた外部磁界の1周期の変化で、超電導体から生じる磁化曲線の面積を求めればよい。すなわち

Fig.7 Strain effect of I_c in VAMAS Nb_3Sn samples at high fields.¹⁴⁾

$$\text{交流損失} = \int H \cdot dM = \int M \cdot dH \quad (1)$$

磁化の単位は $[T] = [Wb/m^2]$ であり外部磁界の単位は $[A/m]$ である。したがって交流損失は

$$\begin{aligned} [Wb/m^2][A/m] &= [Wb/m^2][N/Wb] \\ &= [J/m^3] \end{aligned}$$

の単位を持つエネルギー損失である¹⁵⁾。超電導体の場合、磁性体の常磁性的なヒステリシス損失と異なり、反磁性的損失であることに注意する。磁化 M が外部磁界 H に対し可逆的であると、交流損失は生じない。理想的な第一種超電導体や H_{c1} 以下の第二種超電導体がこれに相当する。一方、実用超電導材料である第二種超電導体では、 H_{c1} 以上になると、磁束線の侵入に伴うピン止め力によるヒステリシス損失が発生する。複合多芯線では、超電導フィラメント間で生じる結合損失や安定化材内で生じる渦電流損失が加わる。さらに輸送電流を伴う場合には、実効抵抗による損失も考慮する必要がある。

超電導体の磁化曲線を求めるには、通常の磁性体の研究で用いる磁化測定方法が適用できるが、試料を冷却するためのクライオスタットが必要となる。Table 2に現在利用できる主な装置をまとめた。市販品としてはVSM（振動試料型磁力計）とSQUID磁束計の2種が最も普及している。超電導体の完全反磁性的磁化は比較的大きく、これらの装置で感度は十分である。装置は磁化の単位をemuで表示することが多く、交流損失値を求めるにはMKS単位に換算する必要がある。これらの装置は、試料形状、外部磁界の条件に制約があり、小さな試料で周波数に依存しないヒステリシス損失を低～中磁界（ ≤ 6 T）で測定するのに有効である。ただしSQUID磁束計では、磁化曲線の面積を求めるためには多くの測定点が必要で、測定に時間を要す。

交流損失測定の主対象となる複合多芯線では、変動磁界やバイアス磁界下の交流損失値が必要となる場合が多い。このためにはピックアップコイルを用いた測定方法がしばしば用いられる¹⁶⁾。本方法では、検出コイル系を製作することが必要であり、測定感度もSQUID等のシステムより低くなるが、磁界条件を任意に設定できるため、実際の使用条件を模擬した測定が可能であり、有用な情報を得ることができる。本方法については4.4で詳述する。

4.2 熱量法

熱量法（蒸発法）はコイル形状の線材の交流損失を測定するのに適しており、とくに輸送電流を流した場合の自己磁界・電流下での損失評価に有効な方法である。測定系は、クライオスタット、試験コイル、通電電源、冷媒の蒸発量を測定する流量計または冷媒の液面変化を測定する液面計で構成される¹⁷⁾。測定方法は、無通電状態での自然蒸発量を測定した後、通電状態の蒸発量を測定し、両者の差を試験コイルの交流損失とする。交流損失の絶対値はヒーターで校正する。測定精度向上のためには、測定時の系を定常状態にすること、測定時間を長くすること、リード線等からの

Table 2 Typical methods of magnetization measurement for superconductors.

Method	Sample	Sensitivity	Magnetic field	Frequency	Temperature
VSM	Chip	$10^3 - 10^{-5}$ emu	- 1 T	DC	4.2 K, 77 K
SQUID	Chip	$10^0 - 10^{-8}$ emu	- 5 T	DC	4.2 - 77 K
Pickup coil	Chip	$> 10^{-5}$ T	-10 T	DC - 10^2 Hz	4.2 K, 77 K
	Wire	$= 8 \times 10^{-3}$ emu			

侵入熱を極力小さくすることが必要である。測定した損失量は、コイル全体の損失であり、コイルを構成する線材単位体積当たりの損失に換算するためには、コイルの磁界分布を考慮する必要がある、解析方法も提案されている¹⁸⁾。熱量法による測定は、磁化法と比べ精度や測定の簡便さでは劣るが、損失が直接熱量の形で得られるメリットがある。

4.3 その他の方法

電気的な測定方法では、結合損失時定数を直接測定する方法や実効抵抗測定から交流損失を求める方法がある。前者は大型の超電導導体の損失を短尺試料で求めることができるため、とくに核融合マグネット用導体の評価に有効であり、種々の結果が報告されている¹⁹⁾。後者は、輸送電流による交流損失やマグネット損失の測定で用いられる方法で、損失による発生電圧を輸送電流とかけあわせて時間積分することによって、交流損失の測定が可能である²⁰⁾。この場合、誘導電圧の打ち消しがログスキーコイルやキャンセルコイルで必要であり、また損失には、測定系に結合する電流リードや金属クライオスタット等の渦電流損失が含まれることに注意する必要がある。さらに特殊な方法として、最近では $\tan \delta$ 計による測定も試みられている²¹⁾。

4.4 複合多芯線の測定

4.4.1 測定原理 (ピックアップコイル法)

本方法の構成例を Fig. 8 に示す。測定は外部から 1 周期の磁界振幅を与え、試料から発生する磁化をピックアップコイルの起電力を積分することによって検出し、磁化曲線を描く。1 サイクル当たりの交流損失値は磁化曲線の面積を算出することにより求まる。線材を測定する場合、試料空間の制約から磁束密度 (B) を測定するピックアップコイルと外部磁界 (H) を打ち消すためのキャンセルコイルを同芯円状に巻き、試料は二つのコイルの間に配置する場合が多い^{22~24)}。

測定原理を Fig. 9 によって説明する。ここで

Φ_1 [Wb]: ピックアップコイルが検出する磁束

Φ_2 [Wb]: キャンセルコイルが検出する磁束

S_1 [m²]: ピックアップコイルの有効平均断面積

S_2 [m²]: キャンセルコイルの有効平均断面積

n_1 : ピックアップコイルのターン数

n_2 : キャンセルコイルのターン数

H_{ex} [A/m]: 外部磁界

H_{eff} [A/m]: 有効磁界 ($=H_{ex} - N \frac{M}{\mu_0}$)

Fig. 8 Typical AC loss measurement system. A magnetization loop from the sample is measured by the integration of the output voltage of the pickup coils when external magnetic field is applied.

Fig. 9 Sample geometry: sketch of sample, pickup coil and cancel coil. Usually, a sample of 1-layer solenoid coil is inserted between the series-opposing balanced coils.

N : 試料の反磁界係数

M [Wb/m²]: 試料の磁化

S_3 [m²]: 試料の有効断面積

と定義すると、 Φ_1 と Φ_2 はおの

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= n_1 (MS_3 + \mu_0 H_{eff} S_1) \\ &= n_1 (M(S_3 - NS_1) + \mu_0 H_{ex} S_1) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\Phi_2 = n_2 \mu_0 H_{ex} S_2 \quad (3)$$

と表される²⁵⁾。試料のない場合には、ピックアップコイルとキャンセルコイルに誘起される電圧が完全に打

Table 3 Important points in making a pickup coil system.

Equipment	Checking point	Action
Sensitivity	Uniformity of magnetic field	Uniformity of sample area, Coil length
	Canceling of the signal	Variable resistance, Mutual inductance
	Noise	Shield wire, Noise shield, Stability of power supply
Conditions	Temperature variation	Good cooling condition
	Intensity of magnetic field	Cu-coil, SC-coil
	Frequency of magnetic field	Pulse-coil, AC-coil
Sample	Non-inductive condition	Single layer solenoid, Byfiler-noninductive
	Sample form	Demagnetization factor

ち消し合うように逆向きに配置する。すなわち(2)式の第2項と(3)式は打ち消しあう。試料が存在する場合には2個のコイルから検出される磁束($\Phi_1 - \Phi_2$)と試料の磁化(M)の関係は、

$$\Phi_1 - \Phi_2 = n_1 M (S_3 - NS_1) \quad (4)$$

となる。したがって、1サイクル当たりの交流損失値 Q は(1)式と(4)式より

$$Q = \frac{1}{n_1(S_3 - NS_1)} \int (\Phi_1 - \Phi_2) dH \quad (5)$$

となる。本式において n_1 , N , S_1 , S_3 が正確に求まれば交流損失値を求めることができる。これらに関する注意点を以下に述べる。 n_1 はコイル製作時に正確に巻き数を数えればよい。反磁界係数はよく知られているように球では1/3、長い円柱を垂直に磁化する場合1/2、平板を垂直に磁化する場合1である。それ以外は回転楕円体で近似して $N_x + N_y + N_z = 1$ の関係を用いる。線材の測定では単層巻き、無誘導多層巻き試料が用いられ、その場合 N はおおよそ1/2, 0である。 S_1 は

$$S_1 = \frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} S_i = \frac{\pi}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} (a_i)^2 \quad (6)$$

であるが、通常コイルの直径は数十mm程度であるので 0.05 mm^2 から 0.1 mm^2 程度の細い銅線を用いれば、 a_i は巻き枠の半径としてよい。それは半径 R の円形断面を持つ細い導線を、直径 a_0 のコイルに巻いた場合の有効平均半径は

$$a_{\text{eff}} = a_0 \left(1 - C \left(\frac{R}{a_0} \right)^2 \right) \quad (7)$$

で与えられるので上述の条件では、第2項は十分小さくなるからである(C はコイル中の磁界分布によって決まる係数で、一様な磁界が印加された場合1/8、コイルの中心に球状磁性体を配置した場合-3/4となる)²⁶⁾。 S_3 に関しては線材試料の場合、体積の等価な

円柱で近似する²⁷⁾。実際にはこれらの校正を実施しても、測定試料と同様な形状を有す標準試料(たとえば高純度Pbの完全反磁性領域等を利用して)の出力を基準にして、絶対値を算出するほうが簡便であり、データの信頼性も高い。

4.4.2 測定装置

装置製作上の注意事項をTable 3にまとめた。磁界均一度は経験上1%は必要である。ピックアップコイルとキャンセルコイルの打ち消しは不十分なことが多く、可変抵抗による分圧がよく用いられるが、二つのコイルの起電力変化の位相ずれを起こす可能性が出てくる。可変インダクタや補償コイルによる調整も用いられている。ノイズはコイルと測定系を結ぶ導線部から拾う磁束を減少する配線の工夫とシールド材の使用によりある程度減少できる。ピックアップコイルからの信号は、最近発達してきたストレージオシロ等により、簡単に時間積分処理ができるようになった。ただし、低周波の測定では積分によって生じる零点移動をさける工夫が必要である。精度向上には繰り返し測定による平均化処理も有効である。またパソコンを用いた信号処理も多く行われている。これらの対策を行うことによって 10^{-5} T 程度まで感度をあげることが可能である。外部磁界の印加には一般に超電導コイルが使用される。1サイクルの測定にはバイポーラ電源が使用されるが、超電導コイルのインダクタンスが小さい場合には電源からのノイズにも注意する必要がある。周波数の高い領域では、銅コイルが用いられていたが最近のパルス用、交流用超電導線の開発により、商用周波数領域までも超電導コイルを用いることが可能になっている。測定空間の磁界の質が高くなり、高周波(>100 Hz)での精度よい測定ができる²⁸⁾。試料は単層ソレイノイド巻きやバイファイラー無誘導巻きが

Fig. 10 Magnetization loops in the zero bias field (B_B) and ± 2 T pulse field (B_P) when twist pitch length (l_p) is changed from 4 mm to 10 mm. It is recognized that the width of the vertical axis increases with twist pitch length. This phenomenon is caused by the addition of coupling losses to the hysteresis losses.

よく用いられる。多層巻きの場合には試料が完全に無誘導でないと正しい値が求まらないので、注意を要する。交流損失の大きい試料では測定中に自己の交流損失によって発熱し、磁化曲線が歪む場合があり、冷却にも注意することが重要である。

4.4.3 測定例

Fig. 10, 11 に超電導発電機の界磁巻線用 NbTi 超電導線を試料として、ピックアップコイルシステムを用いた磁化曲線の測定例を示す²⁹⁾。Fig. 10 は線材のツイストピッチを種々変えた場合について 10 T/s の励磁速度で ± 2 T の磁界振幅を与えた場合の測定結果である。結合損失の増加による磁化曲線の変化が明瞭に示されている。交流損失は磁化曲線の面積を計算することによってヒステリシス損失 9.0 kW/m^3 、全損失 ($l_p = 10 \text{ mm}$ の場合) 20.7 kW/m^3 と求められる。また Fig. 11 はバイアス磁界を変えた場合の磁化曲線を観測した結果である。ヒステリシス損失が支配的であるために、バイアス磁界の増加とともに交流損失が減少する結果が示されている。

VAMAS においても、NbTi 多芯線の共通試料を用いた磁化法による測定、およびコイル状試料を用いた

Fig. 11 Magnetization loops in the DC bias field (B_B) from 0.5 T to 5 T when a pulse field, ± 1 T, 2.5 Hz, is applied. The magnetization loop become small as the bias field increases.

熱量法でのラウンドロビンテストが実施された。共同研究の成果として、各研究機関での異なる測定方法 (VSM 法、ピックアップコイル法) による損失値や理論式との比較検討結果が報告されている^{16,30)}。

参考文献

- 1) E.J. Kramer: J. Appl. Phys. 49 (1973) 1360
- 2) 電気学会編：超電導ハンドブック、オーム社、東京 (1968) 50
- 3) L.F. Goodrich and F.R. Fickett: Cryogenics 22 (1982) 225
- 4) 田中靖三：低温工学 22 (1987) 92
- 5) A.F. Clark and J.W. Ekin: IEEE Trans. Magn. MAG-13 (1977) 38
- 6) J.W. Ekin: J. Appl. Phys. 49 (1978) 3406
- 7) J.W. Ekin: J. Appl. Phys. 49 (1978) 3410
- 8) 中山茂雄, 村瀬 暁：第33回低温工学研究発表会 A1-23 (1985) 27
- 9) A.F. Clark, G. Fujii and M.A. Ranney: IEEE Trans. Magn. MAG-17 (1981) 2316
- 10) 中山茂雄, 村瀬 暁：第32回低温工学研究発表会 B3-12 (1984) 151
- 11) L.F. Goodrich, S.L. Bray and T.C. Stauffer: Adv. Cryog. Eng. 36A (1989) 117
- 12) J.W. Ekin: Cryogenics 20 (1980) 611
- 13) 松下照男：低温工学 24 (1989) 143
- 14) K. Tachikawa, K. Itoh, H. Wada, D. Gould,

- H. Jones, C.R. Walters, L.F. Goodrich, J.W. Ekin and S.L. Bray: IEEE Trans. Magn. **MAG-25** (1989) 2386
- 15) M. N. Wilson: *Superconducting Magnet*, Clarendon Press, Oxford (1983)
 - 16) 伊藤喜久男ら：第41回1989年春季低温工学・超電導学会予稿集(1989) C2-8
 - 17) 仁田旦三ら：電気学会研究会試料(静止器研究会)(1989) SA-89-18
 - 18) 秋田 調ら：電力中央研究所, 研究報告, T 87107
 - 19) 安藤俊就ら：第33回低温工学研究発表回予稿集(1985) A3-10
 - 20) H. Brechna: *Superconducting Magnet System*, Springer-Verlag, Berlin (1973) 294
 - 21) 笠原泰文ら：電力中央研究所, 研究報告, T 88075
 - 22) H. Tateishi, et al.: *Cryogenics* **22** (1982) 509
 - 23) 清水えり子, 伊藤大佐：低温工学 **23** (1988) 27
 - 24) A.J. Zaleski, et al.: *J. Appl. Phys.* **56** (1984) 3278
 - 25) 近角聡信：強磁性体の物理(上), 裳華房(1978)
 - 26) 近角聡信：実験物理学講座「磁気」, 共立出版, 東京(1968)
 - 27) T. Ogasawara, et al.: *Cryogenics* **19** (1979) 736
 - 28) 住吉文夫ら：第41回1989年春季低温工学・超電導学会予稿集(1989) C2-7
 - 29) M. Nagata, et al.: *Proc. of 11 th Int. Conf. on Magnet Technol.*, Tsukuba (1989) 1027
 - 30) K. Itoh, et al.: *Adv. Cryog. Eng. Mater.* **36** (1990) 199