安定化材の配置と複合多芯超電導線の結合損失

伊藤 大佐*, 小泉 操*, 浜島高太郎**, 中根 麓***

* 東芝総合研究所エネルギー機器研究所 川崎市川崎区浮島町4-1
 ** 東芝重電技術研究所 横浜市鶴見区末広町2-4
 *** 昭和電線電纜K. K. 超電導研究開発部 川崎市川崎区小田栄2-1-1

(1983年 4 月21日受理)

Filament Bundle Location Influence on Coupling Losses in Superconducting Composites

Daisuke ITO*, Misao KOIZUMI*, Takataro HAMAJIMA** and Fumoto NAKANE***

* Toshiba Energy Science & Technology Lab., R&D Center, Toshiba Corporation
 4-1, Ukishima-cho, Kawasaki-ku, Kawasaki, 210, Japan
 ** Toshiba Heavy Apparatus Eng. Lab., Toshiba Corporation
 Suehiro-cho, Tsurumi-ku, Yokohama, 230, Japan
 *** Showa Electric Wire & Cable Co., Ltd.
 2-1-1, Odasakae-cho, Kawasaki-ku, Kawasaki, 210, Japan

(Received April 21, 1983)

Synopsis:

The ac losses in multifilamentary superconducting composites with different superconducting filament bundle positions have been measured using the magnetization method in order to reveal the relation between filament bundle position and coupling losses.

Loss components depending on dB/dt in a mixed matrix superconducting composite, whose filament bundle is located in a central region surrounded by an outer stabilizing copper sheath, has been compared with another superconducting composite whose stabilizing copper is located in a central region surrounded by an outer filament bundle. In both conductors, key parameters, such as filament twistpitch, wire diameter and amount of copper stabilizer, were almost the same. Applied magnetic field is 2 Tesla with 0.05-2 Tesla/sec field change rate.

Experimental results indicate that coupling losses between filaments in the composite with the filament bundle located in the central region is smaller than the composite with the filament bundle located in the outer region. A similar conclusion was reached theoretically by B. Truck. Coupling loss values obtained by the experiment show good agreement with calculated values with the equations proposed by B. Truck.

It is also pointed out that a copper stabilizer, divided by the CuNi barrier into small regions, like a honeycomb, causes anomalous increasing in the copper resistivity due to Ni diffusion during heat treatment.

1. はじめに

最近, トカマク型核融合炉のポロイダルコイルの開

発を中心とした, 大型の超電導パルスマグネットの開発が, 活発に進められている^{1)~6)}。これらのマグネットの電力損失を, 同じ条件で用いられる常電導磁石の

Fig. 1 Ideal superconductors with different filament bundle locations

損失とくらべて十分小さく抑えることは、超電導磁石の応用分野を広げていくうえで重要である。超電導ボロイダルコイルの場合には、交流損失を蓄積エネルギーの0.2%ぐらいに抑える必要があると言われている。この場合の磁界変化率 $\dot{B}$ は最大毎秒10テスラ程度であるが、 $\dot{B}$ がこのように大きくなると交流損失の中でも、複合多芯線の超電導芯線間の結合損失を減らすことが重要な課題になってくる。一般に、結合損失を小さくするには導体の安定化材の量が少ない方が望ましいが、マグネットの蓄積エネルギーが大きくなると、超電導導体も完全安定化されたものが多くなり、交流損失を減らすのに特別な工夫を施さなければならない¹⁾~⁴⁾。そこで、結合損失と安定化材の配置に関する理論的な研究が行われ始めているが^{7), 8)}、このような観点からの実験的な研究は、未だあまり行われていない。

B. Turck はFig. 1 に示したような超電導芯線束（フィラメントバンドル）の配置の異なる三種類の導体の結合損失を、理論的に比較・検討している⁷⁾。Fig. 1 a) は、芯線束を導体の外周に同軸円筒状に配置したもので、導体中心には芯線束と分離されて安定化材が存在する。この構造の導体を以下でA型の導体と呼ぶことにする。Fig. 1 b) は、芯線束が導体中心部に集中して配置されているもので、外側に安定化材の厚いシースが、やはり芯線束部から分離されて存在する。この構造の導体をB型の導体と呼ぶことにする。ここで、a) と b) の芯線束部における、導体の長手方向に垂直の、局所的な比抵抗 ρ_L は、等しいことにする。Fig. 1 c) は、芯線を導体全体に一樣に分布させたものである。この導体を以下でC型導体と呼ぶ。いずれの導体も外径と、安定化材の量と、超電導芯線の撚りピッ

チが等しいとすると、A型導体の結合損失は、必ずB型導体の損失より大きくなることをTurckが指摘している。C型の損失は、銅比や芯線を埋め込んだ母材（マトリックス）の比抵抗に依存して変化するので、一概には言えない。

A型導体の損失の実測例としては文献8), 9) が、またB型導体の損失の実測例としては文献10), 11) があるが、異なる型の導体損失の実測値を、同一の基準の下に比較検討した例は見られない。

本論文では、安定化材の配置の異なるA型とB型の導体の結合損失を比較するために、導体寸法、安定化材の量、芯線の撚りピッチの三つの条件を基準として揃えた二種類の導体を試作して、実測した損失の比較検討を行うことにより、安定化された低交流損失超電導パルス導体の設計基準を明らかにする。

2. 実験

2.1 比抵抗の測定

超電導線の比抵抗は、導体の長手方向の抵抗を、液体ヘリウム中で導体温度を上げ、超電導状態を破って測定することにより求めた。導体に垂直に磁界を印加し、ヒーターで15K付近に温度を保って、抵抗の磁界依存性を四端子法で測定した。後で述べるように、超電導体を含まない導体の比抵抗も求めたが、この場合は4.2Kで測定した。

2.2 交流損失の測定法と時定数の評価

Fig. 2 に示すように、同軸状に検出コイルと試料導体、および補償コイルを配置した磁化測定装置により、試料導体の磁化曲線を描かせ、得られた履歴曲線の面積から交流損失を求めた。磁化の絶対値は、鉛の試料

Fig. 2 Magnetization measurement apparatus diagram.

$$P_e = \frac{1}{\rho_{\perp}} \left(\frac{l_p}{2\pi} \right)^2 \cdot \dot{B}^2 \quad (\text{W/m}^3) \quad (1)$$

ここで $\rho_{\perp}$ は導体の長手方向に垂直方向の比抵抗、 l_p は芯線の撚りピッチである。(1)式から明らかなように、結合損失の大きさは $\dot{B}$ に依存する。このため、導体間の結合損失を比較するには、構造を決める撚りピッチや垂直比抵抗だけによって定まる、結合損失の時定数 τ を用いるのが便利である¹³⁾。 τ は磁束の導体軸方向の拡散時定数に相当し、超電導線が層状に巻かれている場合には、次式で表わされる¹⁴⁾。

$$\tau = \frac{\mu_0}{\rho_{\perp}} \left(\frac{l_p}{2\pi} \right)^2 \quad (\text{sec}) \quad (2)$$

ここで μ_0 は真空透磁率である。この τ を用いるとの

Fig. 3 Actual superconductor cross section view for type C conductor.
a) Whole cross section b) Microstructure

完全反磁性領域の磁化測定を行って較正されている。一般に、磁界変化率が一定($\dot{B}$)の時に、超電導体の単位体積当りに発生する結合損失 P_e は、次式で表わされる¹²⁾。

(1)式の結合損失 P_e は、次のように表わすことが出来る¹³⁾。

$$P_e = \frac{\tau}{\mu_0} \dot{B}^2 \quad (\text{W/m}^3) \quad (3)$$

(3)式から明らかなように、 τ は P_c の $\dot{B}^2$ 依存性の図が得られれば、その直線の勾配から求めることが出来る。ここでは、試料導体に垂直に±2テスラの台形波状の磁界を印加し、台形波の磁界変化率 $\dot{B}$ を0.05テスラ/秒～2テスラ/秒、まで変化させて、試料導体の損失の $\dot{B}$ 依存性を求めた。

3. 実験結果

3.1 CuNi 障壁による安定化銅の汚染

断面が Fig. 3 のような構造をした、蜂の巣状 Cu10

Fig. 4 Normal conductor cross section with OFHC copper filaments divided by CuNi barrier in a honeycomb format.

%Ni の高抵抗障壁をもつC型に近い構造の導体を製作したところ、十分焼きなましを行ったにもかかわらず、長手方向の比抵抗 $\rho_{||}$ が無酸素銅の通常の比抵抗 ρ_{Cu} よりも異常に大きな導体を得られた。CuNi中のNiや、NbTi芯線のNb、あるいはTiの無酸素銅中への拡散による安定化銅の汚染が原因の一つと考えられたので、NbTi芯線を取り除いたFig. 4のような構造の常電導導体を試作して、 $\rho_{||}$ の磁界依存性の測定を行った。

この導体では、銅が蜂の巣状のCuNi障壁によって仕切られてフィラメント状になっているが、この銅フィラメントの外径を変えた場合の $\rho_{||}$ の磁界依存性をFig. 5に示す。試料導体はいずれも線引き後、350°Cで焼きなましを行ったものを用いた。銅フィラメントの外径が小さくなるにつれて $\rho_{||}$ の増加することがわかる。

焼きなましの温度を変えたときの $\rho_{||}$ の変化をFig. 6に示すが、温度が高くなるにつれて $\rho_{||}$ も増加することがわかる。以上の結果は、CuNi障壁で安定化銅

Fig. 5 Magnetoresistance effects of OFHC copper filaments dependence on filament diameter. Annealing temperature is 350°C.

Fig. 6 Magnetoresistance effect of OFHC copper filaments dependence on annealing temperature. Diameter of copper filaments divided by CuNi as honeycomb is 6 μm .

が蜂の巣状に仕切られた構造の導体で起る $\rho_{||}$ の増加の原因が、加熱時にNiが無酸素銅中へ拡散したことによるものであることを示している¹⁵⁾。

このように、CuNi障壁を用いて安定化材を蜂巣状に一樣に仕切るC型の導体では、A型やB型の導体と

安定化銅の量を揃えたものを製作しても、安定性の悪い導体が出来ることになる。安定化条件を揃えた導体の結合損失を比較することが本論文の主旨であるので、以上の理由からC型の導体を損失測定の対象から除外した。

3.2 安定化材の配置と結合損失

安定化材の配置と結合損失の関係を調べるための試料導体の断面写真を、Fig. 7 に示す。Fig. 7 a) の導体の芯線束は、導体の外周近くに配置されており、A型の導体構造に相当する。一方、Fig. 7 b) の導体の芯線束は、導体の中心軸の近くに集中して配置されており、B型の導体構造に相当する。

Fig. 7 Actual superconductor cross sections
a) Type A conductor
b) Type B conductor

これらの導体の芯線束単位部 (Fig. 7 で六角形の部分) は、いずれも蜂の巣状の Cu10%Ni 障壁で仕切られたFig. 3 と同様の三層構造になっており、マトリックスの構成がほぼ等しいので、両導体の芯線束部の比抵抗 ρ_L は等しいと考えてよい。Fig. 7 中で六角形の芯線束単位間に白く見える部分も CuNi である。これらの導体の諸元を Table 1 に示す。マトリックス比

Table 1 Conductor parameters

strand structure	strand dia. (mm)	matrix ratio	filament dia. (μm)	twist pitch (mm)
	2.6	8.51	10.7	39
	2.6	7.66	11.3	39

(マトリックスの断面積/NbTi 断面積) と芯線外径が若干異った値になっているが、両方とも線引き前は同じ値に揃えられていた。構造が異なるために線引きの過程で芯線直径に差が生じたが、本研究の場合に重要な安定化銅の断面積は、A型が4.37mm²、B型が4.30mm² とほぼ一致している。したがって両導体の安定化条件はほぼ同一とみなして良い。この他に、導体外径と芯線の撚りピッチが基準として等しく揃えられている。

導体の長手方向の比抵抗 $\rho_{||}$ の測定を行い、有効数字二桁まで両導体の $\rho_{||}$ が同じであることを確認した。1 テスラでの $\rho_{||}$ は、いずれも $1.0 \times 10^{-10} \Omega \cdot m$ であった。

Fig. 8 ac losses vs $\dot{B}^2$.

これらの導体の交流損失 P の $\dot{B}^2$ 依存性をFig. 8 に示す。ただし、全交流損失からピンニング損失に相当する $\dot{B}$ に依存しない損失を除去した量を、縦軸にとっている。以下で交流損失という場合は、特に断わらない限り芯線間の結合損失と渦電流損失、すなわち $\dot{B}^2$ に比例する損失を示すことにする。2.2 節で述べた方法で、勾配から時定数を評価すると、A型導体の時定数は33msec、B型の時定数は15msec と求まった。このようにA型導体の損失は、B型導体の損失の2倍以上となり、芯線束の配置が導体の交流損失に大きな影響を及ぼすことが実験的に明らかになった。芯線束が中心に集中している導体の方が損失が少ないという傾向は、Turck が理論的に指摘した結果と定性的に一致し

ている⁷⁾。

4. 結果の検討

以上述べてきたように、実験結果はTurckが理論的に指摘した結果と定性的に一致する傾向を示している。そこで、これらの導体の結合損失を計算で求め、実験結果がこれまでに提案されている式で定量的に説明出来るか否かを検討してみる。ただし、ここで使用した導体の芯線束の配置は、Fig. 7 a) b) から明らかなように真円形からずれたものになっているので、理論との比較には限度があることに留意する必要がある。

Fig. 7 の導体は幾何学上の制約と製造上の理由により、完全なA型あるいはB型の構造にはなっていない。すなわち、いずれの導体も銅シースと銅コアをもつ構造となっている。このため、芯線束部の損失と、その外側の安定化材シースの損失、およびその内側の安定化材コアの損失を評価するそれぞれの式を組み合わせ、全損失を計算する。

4.1 交流損失の計算方法

まず、芯線束の外側の、銅シース部での損失を計算する式について述べる。両導体とも芯線束部と安定化銅シースの境界に、厚さ $12\mu\text{m}$ の CuNi 障壁が存在する構造となっている。したがって芯線束は二層の金属により覆われている。このような二層の常電導金属で、芯線束が同軸状に囲まれた導体の、常電導金属層での結合損失を与える式がTurckにより提案されている¹⁶⁾。芯線束部の外径を R_f とし、撚りピッチを l_p とすると、芯線束部のすぐ外側の CuNi 障壁層の損失を P_1 、最外層の銅シースでの損失を P_2 とすれば、

$$P_1 = \frac{\dot{B}^2 l_p^2}{4\pi^2} \left(\frac{R_f}{R_2} \right)^2 \cdot \frac{m}{\rho_1} \quad (4)$$

$$P_2 = \frac{\dot{B}^2 l_p^2}{4\pi^2} \left(\frac{R_f}{R_2} \right)^2 \cdot \frac{n}{\rho_2} \quad (5)$$

のように表わされる。ここで R_2 は導体外半径、 ρ_1 は CuNi 障壁層の比抵抗、 ρ_2 は最外層銅シースの比抵抗である。また m と n は、 R_1 を CuNi 障壁層の外半径とすると次式で与えられる。

$$m = \frac{R_1^2 - R_f^2}{R_f^2} (R_f^2 + s^2 R_1^2) a_1^2 \quad (6)$$

$$n = \frac{R_2^2 - R_1^2}{R_1^2} (R_1^2 + R_2^2) a_2^2 \quad (7)$$

ここで

$$a_1 = \frac{R_f}{R_f^2 + s R_1^2} \quad (8)$$

$$a_2 = \frac{a_1(1+s)R_1^2}{R_1^2 + R_2^2} \quad (9)$$

$$s = \frac{\rho_2(R_1^2 + R_2^2) + \rho_1(R_2^2 - R_1^2)}{\rho_2(R_1^2 + R_2^2) - \rho_1(R_2^2 - R_1^2)} \quad (10)$$

である。

次に、芯線束の内側にある安定化銅コアの部分での損失を与える式について述べる。両導体とも芯線束部の内側の導体中心部に、量は異なるが銅コアを配置した構造となっている。Fig. 1 a) のような、芯線束に銅コアが囲まれた構造の導体の結合損失は、外側の芯線束部の損失を P_b 、銅コアの部分での損失を P_0 とすると次式を用いて計算することが出来る⁷⁾。

$$P_b = \frac{\dot{B}^2 l_p^2}{4\pi^2} \left(\frac{R_f^2 - R_0^2}{R_f^2} \right) \frac{1}{\rho_\perp} \quad (11)$$

$$P_0 = \frac{\dot{B}^2 l_p^2}{4\pi^2} \left(\frac{R_0}{R_f} \right)^2 \frac{1}{\rho_0} \quad (12)$$

ここで R_0 は銅コアの半径、 ρ_0 はその比抵抗、 $\rho_\perp$ は芯線束部の垂直比抵抗である。(11)式は垂直比抵抗が $\rho_\perp$ のC型導体の損失から、半径 R_0 の銅コアに相当する領域で発生する損失を差引いたものとなっている。また(12)式は比抵抗が ρ_0 の金属コアをとり囲む円周状の芯線束により、コア部で発生する結合損失を表わしている¹²⁾。

(4)式～(12)式までを組み合わせ、Fig. 7 の導体の全損失 P_{coup} を表わす式をつくると

$$P_{\text{coup}} = \frac{\dot{B}^2 l_p^2}{4\pi^2} \left(\frac{R_f}{R_2} \right)^2 \left\{ \frac{k}{\rho_\perp} + \frac{l}{\rho_0} + \frac{m}{\rho_1} + \frac{n}{\rho_2} \right\} \quad (13)$$

となる。ここで k と l は以下のようになる。

$$k = \frac{R_f^2 - R_0^2}{R_f^2} \quad (14)$$

$$l = \left(\frac{R_0}{R_f} \right)^2 \quad (15)$$

実際には、以上の超電導芯線間の結合に起因する結合損失の他に、銅線のような低抵抗の常電導金属が変動磁界中に置かれた場合に生じる、渦電流損失 P_e が加わる。導体中心軸に垂直の変動磁界による銅シースでの渦電流損失は、次式により表わされる¹⁷⁾。ここでは銅コア部の渦電流損失は無視出来るものとする。

$$P_e = \frac{\dot{B}^2}{4} \cdot \frac{1}{\rho_2} \left(\frac{R_2^4 - R_1^4}{R_2^2} \right) \quad (16)$$

(13)式と(16)式にTable 2の値を代入して、磁界変化率の2乗に依存する全損失 $P_{\text{tot}} = P_{\text{coup}} + P_e$ を求めた。ただし、 $\rho_\perp$ には CuNi の比抵抗 ρ_{CuNi} に、 $(1-\lambda)/(1+\lambda)$ を乗じた値 $\rho_\perp = \rho_{\text{CuNi}}(1-\lambda)/(1+\lambda)$ を用いた。

λ は三層構造芯線束単位部におけるNbTiと、これを囲む銅の占積率である。芯線束部と中心の銅コアの間にも約12 μ mのCuNi障壁が存在するので、 ρ_0 の値は銅コアの直径とCuNiの厚さの比から平均的な比抵抗を計算して求めた。芯線束の形が真円形でないため、最外層銅シースの損失は最も薄い部分で制限されると考えられるので、 R_1 として安定化銅シースの一番薄い部分の値を用いた。

Table 2 Constants used in loss calculations

Conductor type	A	B
R_0 (m)	0.785×10^{-3}	0.165×10^{-3}
R_f (m)	1.088×10^{-3}	0.852×10^{-3}
R_1 (m)	1.1×10^{-3}	0.864×10^{-3}
R_2 (m)	1.3×10^{-3}	1.3×10^{-3}
ρ_0 (Ω -m)	2.15×10^{-9}	9.36×10^{-9}
$\rho_{\perp}$ (Ω -m)	1.57×10^{-8}	1.57×10^{-8}
$\rho_{\parallel}$ (Ω -m)	1.4×10^{-7}	1.4×10^{-7}
ρ_2 (Ω -m)	1.0×10^{-10}	1.0×10^{-10}

4.2 交流損失の計算結果と低減法の検討

これらの値を上述の式に代入して両導体の $\dot{B}$ に依存する損失の時定数を計算すると、A型導体の時定数 τ_A は29.0msec（1テスラの値、以下同じ）、B型導体の時定数 τ_B は15.0msecと求まった。これらの値の実測値は33msecと15msecであるが、芯線束の形が真円形でないことなどを考慮すると、実測値と良く一致しているものとみなすことが出来る。したがって実導体の結合損失は、前述の式を用いてある程度定量的に予測出来ると言ってよい。

両導体の損失の各成分を、(13)式と(16)式に基き、A導体の全損失を基準にとってTable 3に示した。A型導体の損失がB型導体に比べて大きくなった原因は、基本的には芯線束の外径が大きくなったために、芯線束間へと侵入する磁束の総量が大きくなったこと

による。しかし、(13)式を用いて細い点まで検討すると、A導体では主として銅コア部とCuNi障壁及び銅シース部で損失が大きいことになる。またB型導体の結合損失の大部分が、CuNi障壁での損失であることから、CuNi障壁の厚さを更に厚くして、障壁を横切って流れる結合電流を抑制すれば、この導体の損失をもっと減らすことが出来ることになる。CuNi障壁の厚さを12 μ mから100 μ mへと厚くして損失を計算すると、B型導体の結合損失は2.7msecまで減少し、残りの結合損失の48%は芯線束部の損失で、49%は芯線束の外側での損失となる。したがって撚りビッチをそのままにしてこの導体の損失をこれ以上小さくするには、芯線束部の垂直比抵抗 $\rho_{\perp}$ も増加させる必要があることなどがわかる。

しかし、このようにCuNi障壁を厚くして損失を低減させようとする、と、芯線束が銅にくらべて熱伝導の悪いCuNiで厚く覆われるようになるため、芯線束の冷却条件が悪くなるものと考えられる。これに対し放射状のCuNiフィン²⁾を銅シースに付けることによっても、冷却条件を損わずにCuNi障壁を厚くすると同様の効果を得ることが出来る。この場合は、銅シースの平均の比抵抗が増加したことに相当する。この種のフィン付き導体は既にいくつか報告されているが²⁾11)18)，B型導体にフィンを付ける場合にはフィンの厚さの合計を400 μ mにすると、結合損失の時定数を3 msec程度にすることが出来る。

B型導体の渦電流損失の時定数を16式から求めると約4 msecとなるが、CuNiフィンでシースを細分化することにより、渦電流損失をさらに減すことが可能となる。

結局、導体の冷却条件や渦電流損失も考慮すると、同心円状のCuNi障壁よりも、放射状のフィンを用いる方が望ましいと言えることが出来る。

以上の議論では、1テスラで時定数を測定し、また計算しているため、時定数の値は比較的大きな値となっている。これらの導体を7テスラ付近で使用する場

Table 3 Calculated values of loss component in type A and B conductors

Conductor Type	Copper Core	Filament Bundle	CuNi Barrier	Copper Sheath		Total Losses
				Coupling	Eddy Current	
A	0.284	0.035	0.389	0.202	0.090	1
B	0.002	0.044	0.284	0.039	0.148	0.517

合には、Fig. 5 からも明らかなように、磁気抵抗効果によって無酸素銅の比抵抗が約 4 倍に増加するので、時定数の値もこれに応じた小さな値になる。

5. むすび

線径、安定化銅量、芯線の撚りピッチの三つの基本条件を揃えた、超電導芯線束の配置が異なる導体の交流損失を比較・検討した結果、以下の事が明らかになった。

- 1) 芯線束を導体の中心部に集中して配置した方が、外周近くに分布させるよりも結合損失が小さくなる。この実験により得られた結論は B. Turck が理論的に導いた結論と一致している。
- 2) CuNi 障壁を用いた三層構造導体の場合には、超電導芯線束部と安定化銅部を分離して配置した方が良い。芯線束を蜂の巣状の障壁で仕切って、安定化材中に一様に配置すると、安定化銅が Ni により汚染され、同一銅量の、安定化銅を分離して配置した導体とくらべ、安定性が悪くなる。
- 3) 結合損失の測定値と計算値が良く一致したことから、低交流損失導体の設計に本論文で用いた式を用いることが出来る。

結合損失の低減法としては、既に良く知られている、芯線の撚りピッチを小さくする。芯線を埋め込んだ母材の比抵抗を大きくするなどの方法や、放射状の CuNi フィンや、同軸状の CuNi 障壁を用いる方法等がある。これらの方法を、上述の本研究で明らかになった諸事実と併用することにより、安定性に優れた低損失パルス超電導導体を得ることが出来る。ただし、芯線束をとり囲む同軸円筒状の CuNi 障壁を厚くすると、冷却特性が悪くなり安定性上の問題を生じる可能性があると考えられるので、今後この点に関する研究が必要であろう。線径が大きく、渦電流損失が問題になるような場合には、CuNi フィンを用いることにより結合損失と渦電流損失の両方を減らすことが出来る。

最後に、Ni の無酸素銅中への拡散について助言を頂

いた東芝総合研究所・堀上徹主任研究員、および実験に際し助力頂いた東京電機大学学生・大淵聡氏に謝意を表す。

参考文献

- 1) S.H. Kim et al.: Proc. 9th Symp. on Engi. Prob. of Fusion Res. (1982) 2016.
- 2) J.J. Wollan et al.: IEEE Trans. Mag., **MAG-17**, (1981) 482.
- 3) S. Shimamoto et al.: Proc. 9th ICEC, (1982) 450.
- 4) T. Onishi et al.: ibid., (1982) 446.
- 5) D. Ito et al.: ibid., (1982) 138.
- 6) E. Hoffman et al.: IEEE Trans. Mag., **MAG-17**, (1981) 521.
- 7) B. Turck: Cryogenics, **22**, (1982) 466.
- 8) F. Sumiyoshi et al.: ibid., **22**, (1982) 155.
- 9) H. Tateishi et al.: Proc. 9th ICEC, (1982) 727.
- 10) J.J. Wollan: Proc. 9th Symp. on Eng. Prob. of Fusion Res., (1981) 640.
- 11) S.S. Shen et al.: IEEE Trans. Mag., **MAG-15**, (1979) 232.
- 12) H. Brechna: "Superconducting Magnet Systems" Springer-Verlag Berlin (1973) 251.
- 13) A.M. Campbell: Cryogenics, **22**, (1982) 3.
- 14) J.P. Soubeyrand et al.: IEEE Trans. Mag., **MAG-15**, (1979) 248.
- 15) F. Nakane et al.: Proc. 9th ICMC, (1982) 203.
- 16) B. Turck: J. Appl. Phys., **50**, (1979) 5397.
- 17) W.A. Fietz: IEEE Trans. Mag., **MAG-13**, (1977) 807.
- 18) H. Brechna: "Superconducting Magnet Systems" Springer-Verlag Berlin (1973) 286.