Bi-2223 系転位型ケーブル導体用丸線の開発

種子田賢宏[†], 藤上 純, 大松 一也, 武井 廣見,
松尾 公義*, 本庄 昇一*, 三村 智男*, 高橋 芳久*

住友電気工業 (株) 大阪市此花区島屋 1-1-3 ([†]E-mail:taneda-takahiro@sei.co.jp)

* 東京電力 (株) 横浜市鶴見区江ヶ崎町 4-1

(2000 年 2 月 7 日受理)

Development of Bi-2223 Round Strand for Transposed Cable Conductor

Takahiro TANEDA, Jun FUJIKAMI, Kazuya OHMATSU, Hiromi TAKEI,
Kimiyoishi MATSUO*, Shoichi HONJO*, Tomoo MIMURA* and Yoshihisa TAKAHASHI*

Sumitomo Electric Industries, Ltd., 1-1-3 Shimaya, Konohana-ku, Osaka 554-0024

* Tokyo Electric Power Company, 4-1 Egasaki-cho, Tsurumi-ku, Yokohama 230-8510

(Received February 7, 2000)

Synopsis: Ag-sheathed Bi-2223 round strands for high-temperature superconducting (HTS) transposed cable conductors were developed. The critical current density (J_c) at 77K, 0T reached $2.5 \times 10^8 \text{ A/m}^2$ in a short-length sample and $1.6 \times 10^8 \text{ A/m}^2$ in a 50m-long sample. Several analyses were done to evaluate the basic properties of round strands, such as Bi-2223 volume fraction and crystal alignment, and magnetic field dependence of the J_c . Bi-2223 volume fraction was determined by magnetic susceptibility measurement using a SQUID magnetometer. It was confirmed that the Bi-2223 volume fraction was closely correlated with J_c . The crystal alignment was observed by SEM in the cross section of the round strand. It was found that the crystal alignment angle decreased with increasing J_c . The outgrowth feature of the crystals was also found to be decreased in the high- J_c sample. The crystal alignment angle in the longitudinal direction of the round strand was determined by two different J_c - B curves, in which magnetic fields were applied parallel and perpendicular to the longitudinal directions. An assumption was employed in the analysis that J_c was suppressed only by the c-axis component of the applied magnetic field. It was also found that the crystal alignment angle in the longitudinal direction of the round strand was decreased with increasing J_c .

Keywords: Bi-2223, round strand, critical current density, AC losses, transposed cable conductor

1. はじめに

東京のような大都市部の地下空間は電力, ガス, 水道, 通信といったライフラインをはじめ, 地下鉄, 地下街, ビルなどの地下交通網, 構造物が入り組んでいる。電力ケーブルは地中の洞道, 管路などの中に収められているが, 電力需要の増大に合わせて新たに建設するのは容易ではない。高温超電導ケーブルはコンパクトで大電流を送ることができることから, 既存の管路中のケーブルを高温超電導ケーブルで置き換えるケ

ースでは, 冷却・運用のコストを考慮しても, 経済的メリットが得られる¹⁾。

高温超電導ケーブルでは, Bi-2223 系テープ線材を用いた多層スパイラル導体の開発が進んでいる。しかし, 大容量化するために単純にテープ線材を積層すると外層の線材はインピーダンスが小さくなるため, 電流が外層に集中し, 送電損失の原因となる²⁾。

多層スパイラル導体の均流化の手段としては各層の巻きピッチの調整によるインピーダンスの均一化が有効な方法として検討されている^{3~5)}。また, 複数のテ

ープ線材を転位する方法も検討されている⁹⁾。しかし、テープ線材に許容される歪みの範囲では、巻きピッチや転位のピッチ等の導体設計の自由度が小さくなり、大容量化と十分な低損失化との両立が課題となっている。一方、線材断面が丸形状の線材が開発できれば、各素線のインピーダンスが均一で低損失な導体ができ、大容量導体の設計も比較的容易となる可能性がある^{7,8)}。

東京電力と住友電気は共同で高温超電導ケーブルの要素技術開発に取り組んでおり、その中で Bi-2223 系の丸形状線材を用いた転位型ケーブル導体の開発を行っている。これまでに臨界電流 $I_c=1\sim 2$ kA 級 (77 K, 0 T) のプロトタイプケーブル導体を試作・評価し、損失低減が可能である事を示してきた^{9~12)}。

実規模の大容量導体を実現するためには、素線の臨界電流密度 J_c 、オーバーオール J_c (J_c) の向上および長尺化が重要な課題となる。ここで、 J_c は素線の断面において母材を除いた部分の単位面積当たりの臨界電流値、オーバーオール J_c は素線の全断面の単位面積当たりの臨界電流値である。これまでの開発により丸線の J_c は、短尺線材で 1.7×10^8 A/m² (77 K, 0 T) が、50 m 長の線材で 1.0×10^8 A/m² (77 K, 0 T) が得られている¹³⁾。Bi-2223 系の丸形状の線材の研究は他のグループでも行われているが、 J_c はいずれも 10^7 A/m² (77 K, 0 T) のオーダーである^{14~18)}。

本研究では、これらの課題の中でも特に J_c 向上に重点的に取り組み、 J_c の異なる線材について基礎的な特性評価を行い、 J_c を決定する要因を整理するとともに、さらに高 J_c の線材を得た結果を報告する。

2. 実験方法

2.1 線材作製

転位型ケーブル導体用に開発した丸線の典型的な断面写真を Fig. 1 に示す。丸線は粉末充填法で作製し、母材には銀または銀マンガン合金を用いている。この線材の特徴は、Bi-2223 超電導体のフィラメントの断面形状が矩形になっており、かつ線材の中心の周りにほぼ同心円状に配置されていることである。

テープ線作製の中間工程で得られるような単純な丸線では、フィラメントの断面形状がほぼ円形であるため、焼結時に超電導結晶粒がバラバラな方向に成長し、結晶粒の配向性および接合性が悪くなり、 J_c が 1×10^7 A/m² (77 K, 0 T) 程度となっていた。フィラメント形状を工夫した丸線では、単純な丸線に比べ焼結時に

超電導体が配向しやすくなり、 J_c が 1.0×10^8 A/m² (77 K, 0 T) 程度まで飛躍的に向上した⁹⁾。

また、フィラメントが線材の中心に対して対称的に配置された構造は、外部磁界が線材長手方向に対して垂直に印加されたときの J_c の磁界方向依存性を小さくしている。

2.2 測定方法

丸線の基礎特性として I_c 、臨界電流密度 J_c の外部印加磁束密度 B 依存性 (J_c - B 特性)、および帯磁率 χ の温度 T 依存性 (χ - T 特性) について測定を行った。

I_c は液体窒素中、自己磁界下で通常の直流四端子法により測定した。 I_c 基準には $100\ \mu\text{V/m}$ を用いた。

J_c - B 特性については丸線の構造を考慮し、線材長手方向 L に対して磁界を垂直に印加した場合 ($B\perp L$ と記す) と、線材長手方向 L に対して磁界を平行に印加した場合 ($B\parallel L$ と記す) との二通りの場合について測定した。磁界が印加されていること以外は I_c 測定と同じ条件で測定を行った。

χ - T 特性については SQUID を用いて以下のように測定した。試料に外部磁界を印加しない状態で室温から 5 K まで冷却 (ZFC) した後、5 K で磁界を印加し (磁束密度: 10^{-3} T)、5 K から 120 K までの温度範囲で温度を上げながら帯磁率 χ を温度 T の関数として測定した。さらに、この χ - T 曲線から超電導相に占める Bi-2223 相の体積分率を、(Bi-2223 相の体積分率) = (Bi-2212 相の T_c における帯磁率) / (5 K における帯磁率) のように定義し、Bi-2223 相の体積分率と J_c との関係求めた。

Fig. 1 Typical cross section of a round strand. Thirty-three Bi-2223 filaments are arranged symmetrically.

Table 1 Specifications of round strands at 77 K, 0 T.

Sample No.	1	2	3	4
Diameter (mm)	0.93	0.95	0.95	0.86
Length (m)	4.0×10^{-3}	5.0×10^{-2}	1.0×10^{-2}	5.0×10^1
Ag/SC ratio	7.2	5.5	2.9	8.1
I_c (A)	14.1	16.9	17.0	6.4
J_c (10^7 A/m ²)	2.06	2.40	2.4	1.1
J_c (10^8 A/m ²)	1.69	1.57	0.93	1.0

フィラメントの微細組織については線材横断面のSEM観察を行った。

3. 実験結果

試作した丸線の諸元および特性例を Table 1 に示す。線材 No. 1〜3 は短尺線材の、線材 No. 4 は長尺線材の試作結果である。線材 No. 1 において J_c は 1.7×10^8 A/m² (77 K, 0 T) に達した。線材 No. 2 および線材 No. 3 はオーバーオール J_c の向上を目指した試作で、銀比の低減によりオーバーオール J_c は 2.4×10^7 A/m² (77 K, 0 T) と線材 No. 1 よりも向上している。線材 No. 4 は長尺化を目指した線材長 50 m での試作で J_c は 1.0×10^8 A/m² (77 K, 0 T) に達した。

線材 No. 1 を例にとり、測定した J_c - B 特性を Fig. 2 に示す。縦軸は、外部印加磁束密度の大きさが B のときの臨界電流密度 $J_c(B)$ を自己磁界下の臨界電流密度 $J_c(0)$ で規格化した。比較のため、 $J_c = 2.0 \times 10^8$ A/m² (77 K, 0 T) のテープ線のデータも合わせて示す。テープ線

についても丸線と同様に二通りの外部磁界の印加方向、すなわち $B \perp L$ と $B \parallel L$ の場合について測定した。ただし、テープ線の $B \perp L$ の場合は $J_c(B)$ が外部印加磁界とテープ面とがなす角度に大きく依存するため、ここでは外部印加磁界の方向がテープ面に垂直となる場合について測定した。外部印加磁束密度の大きさの範囲は $B = 0 \sim 10^{-1}$ T で、磁界の上昇過程と下降過程とについて $J_c(B)$ を測定している。テープ線では印加磁界の上昇、下降によるヒステリシスは見られないのに対し、丸線ではヒステリシスが見られる。下側のラインが磁界上昇過程で、上側が下降過程である。ヒステリシスの存在は超電導結晶粒間の弱結合に由来しているといわれており、丸線には弱結合が存在することを示している。

J_c の異なる丸線について、 χ - T 特性を測定した結果を Fig. 3 に示す。温度 T における帯磁率 $\chi(T)$ は 5 K における帯磁率 $\chi(5\text{ K})$ で規格化した。測定に用いた

Fig. 2 Magnetic field dependence of J_c , both with round strand ($J_c = 1.7 \times 10^8$ A/m²) and tape ($J_c = 2.0 \times 10^8$ A/m²). J_c values were normalized by those at $B = 0$ T. The magnetic field was applied parallel or perpendicular to the longitudinal direction of round strand or tape.

Fig. 3 Temperature dependence of magnetic susceptibility of round strands with various J_c values. Magnetic susceptibility values were normalized by those at $T = 5$ K.

Fig. 4 Bi-2223 volume fractions of round strand with various J_c values. The data of tape wire from Ref. 19) were re-plotted in the same graph.

4本の試料の J_c はそれぞれ、 $J_c=0.4, 0.8, 1.4, 1.6 \times 10^8 \text{ A/m}^2$ (77 K, 0 T)であった。

4. J_c を決定する要因に関する考察

4.1 Bi-2223 相の体積分率

Fig. 3 で J_c の低い線材では $T=60 \sim 80 \text{ K}$ に Bi-2212 相の相転移がはっきりと現れているが、 J_c が高い線材では帯磁率-温度曲線が下方に移動するとともに、転移が判別しにくくなる。これは Bi-2223 相の体積分率が増大したこと、および結晶粒の接合性が強くなっていることによると考えられる。Fig. 3 の帯磁率測定の結果から求めた、丸線の J_c と Bi-2223 相の体積分率との関係を Fig. 4 に示す。比較のため、文献 19) から引用したテープ線のデータを併せて示す。 J_c が高い線材ほど Bi-2223 相の体積分率が大きいことがわかる。

4.2 結晶配向性

テープ線のフィラメント内部の超電導結晶粒の配向性を評価する手段としては、一般に線材横断面、線材縦断面の SEM 観察や J_c - B 測定による平均的な結晶配向角度評価が挙げられる。丸線についてもフィラメント配置を考慮した上で同様の評価を行った。Fig. 5 に丸線横断面、縦断面の模式図を示す。

丸線横断面内では矩形のフィラメントが、線材中心に対して対称的に配置されていることから、理想的には一つ一つのフィラメント形状が直線状であり、その中に超電導結晶が整然と配向していることが望ましい。理想状態からのずれを評価するには、例えばある一つ

Fig. 5 Schematic views of Bi-2223 crystal alignment. Gray blocks represent Bi-2223 crystals within a filament in each cross section of round strand: (a) transverse cross section, and (b) longitudinal cross section. θ_T and θ_L are misalignment angles.

のフィラメントに着目し、その重心と線材中心とを結ぶ直線と超電導結晶の c 軸とがなす角度 θ_T のフィラメント内での平均値が指標として考えられる。これは、線材横断面の SEM 観察により評価ができる。

丸線縦断面内では同様に線材長手方向に超電導結晶の a 軸または b 軸が配向しているのが理想的である。しかし、線材縦断面の SEM 観察によって理想状態からのずれを評価するのはフィラメント配置の理由から困難である。そこで、線材横断面と超電導結晶の c 軸とがなす角度 θ_L をいくつかの仮定の下で J_c - B 測定結果から見積もり、線材縦断面内の結晶配向性を評価することにした。

4.2.1 線材横断面内の結晶配向性

Fig. 6 に線材横断面の SEM 写真を示す。比較的 J_c の低い $J_c=5.5 \times 10^7 \text{ A/m}^2$ の試料と J_c の高い $J_c=1.6 \times 10^8 \text{ A/m}^2$ (ともに 77 K, 0 T) の試料とについて、線材横断面の結晶配向性の評価を行った。平均配向角度 θ_T についてはフィラメントの銀界面付近と内部とは大きく異なっていた。内部では乱れが大きく θ_T の定義が困難であったため、大部分の超電導電流は配向性の良い銀界面近傍に流れると見なし、銀界面の結晶の θ_T をもって平均配向角度とした。

低 J_c の試料では母材に大きく突起した結晶が多く見られ、 θ_T は 20° であった。突起した結晶の数を線材の全横断面について数えたところ、線材横断面の単位面積当たり $5.2 \times 10^2 / \text{mm}^2$ であった。一方、高 J_c の試料では θ_T は 13° であった。突起した結晶の数は線材

Fig. 6 SEM observations of crystals in the transverse cross sections. Misalignment angle θ_T was measured at the interface between Bi-2223 crystals and the matrix of the filament. Characteristic outgrowths of Bi-2223 crystals were also observed. The density was measured at the whole cross section of each strand. (a) Low J_c : $J_c=5.5 \times 10^7 \text{ A/m}^2$, $\theta_T=20^\circ$, and the density of outgrowths was $5.2 \times 10^2/\text{mm}^2$. (b) High J_c : $J_c=1.6 \times 10^8 \text{ A/m}^2$, $\theta_T=13^\circ$, and the density of outgrowths was $2.9 \times 10^2/\text{mm}^2$.

Fig. 7 Schematic view of Bi-2223 crystal alignment within a filament in the longitudinal cross section. θ_L is the misalignment angle of the Bi-2223 crystal to the longitudinal direction L of round strand. $B_{\parallel \text{c-axis}}$ is the c-axis component of applied magnetic field $B_{\text{ex} \parallel}$ that is applied parallel to the longitudinal direction L .

Fig. 8 Schematic view of filament alignment in the transverse cross section of round strand. Magnetic field $B_{\text{ex} \perp}$ is applied perpendicular to the longitudinal direction L of round strand. In each filament, Bi-2223 crystals are aligned with misalignment angle $\theta_T=0^\circ$ by assumption (2). The c-axes tilt with angle ϕ to the applied magnetic field $B_{\text{ex} \perp}$, which depends on the position of the filament.

横断面の単位面積当たり $2.9 \times 10^2/\text{mm}^2$ で、低 J_c の試料に比べて 45 %減少した。 θ_T および突起した結晶の数が減少し、配向性が向上するに従い、 J_c が向上していることがわかった。

4.2.2 線材縦断面内の結晶配向性

線材横断面と結晶の c 軸とがなす角度 θ_L をいくつかの仮定の下で J_c - B 測定結果から見積もり、線材縦断

面内の結晶配向性を評価した。ここで用いた仮定は以下の通りである²⁰⁾。

仮定 (1): 超電導結晶は、Fig. 7 のように、線材長手方向に平均配向角度 $\theta_L (<\pi/2)$ でつながっている。 θ_L は線材横断面と結晶の c 軸とがなす角度の平均値である。
 仮定 (2): 単純化のため、線材横断面の平均配向角度は $\theta_T=0^\circ$ とする。

Fig. 9 Example of J_c - B curves used in the calculation of the longitudinal alignment angle of crystals. The angle is determined from two J_c - B curves, in which the magnetic field is applied parallel or perpendicular to the longitudinal direction of round strand.

仮定 (3): 線材横断面内では **Fig. 8** のように、フィラメントが線材の中心に対して回転対称に配置されている。線材長手方向に垂直に磁束密度 $B_{ex}^\perp$ を印加したとき、超電導結晶の c 軸に平行な磁束密度成分の大きさは、フィラメント位置により異なるが、フィラメント位置についての平均値 $B_{\parallel c-axis}$ で代表される。

仮定 (4): 磁界印加時の J_c 低下は、超電導結晶の c 軸に平行な磁束密度成分の大きさ $B_{\parallel c-axis}$ に支配される。

仮定 (1), (2)より、**Fig. 7** のように線材長手方向に平行に磁束密度 $B_{ex}^\parallel$ を印加したとき、超電導結晶の c 軸に平行な磁束密度成分の大きさの平均値は、テープ線、丸線の場合ともに、

$$B_{\parallel c-axis} = B_{ex}^\parallel \cdot \sin \theta_L \tag{1}$$

のように表される。

また、仮定 (1), (2)より、**Fig. 8** のように丸線の線材長手方向に垂直に磁束密度 $B_{ex}^\perp$ を印加したとき、超電導結晶の c 軸と $B_{ex}^\perp$ とが角 ϕ をなすフィラメント位置では、超電導結晶の c 軸に平行な磁束密度成分の大きさは、

$$B_{\parallel c-axis}(\phi, \theta_L) = B_{ex}^\perp \cdot |\cos \phi| \cdot \cos \theta_L \tag{2}$$

のように表される。仮定 (2), (3)より、超電導結晶の c 軸に平行な磁束密度成分の大きさの平均値は、

$$B_{\parallel c-axis} = \frac{\oint_\theta B_{\parallel c-axis}(\phi, \theta_L) d\phi}{\oint_\theta d\phi} \tag{3}$$

Table 2 Example of θ_L determined from **Fig. 9**.

$J_c(B)/J_c(0)$	$B_{ex}^\parallel$ (T)	$B_{ex}^\perp$ (T)	θ_L (deg)
0.60	0.0252	0.0065	9.3
0.55	0.0306	0.0080	9.4
0.50	0.0382	0.0095	9.0
0.45	0.0539	0.0128	8.6
0.40	0.0604	0.0166	9.9
Average 9.3			

で表される。式 (3)に式 (2)を代入すると、

$$B_{\parallel c-axis} = \frac{2}{\pi} \cdot B_{ex}^\perp \cdot \cos \theta_L \tag{4}$$

となる。

この係数 $2/\pi$ は丸線に特有のもので、テープ線の場合には超電導結晶の c 軸に平行な磁束密度成分の大きさの平均値は、

$$B_{\parallel c-axis} = B_{ex}^\perp \cdot \cos \theta_L \tag{5}$$

と簡単に表される。

仮定 (4) より磁界印加時の J_c は $B_{\parallel c-axis}$ に支配される。言い換えれば、 J_c - B 測定において線材長手方向に平行および垂直に磁界を印加した時、同じ J_c 値であれば、丸線の場合には等式

$$B_{ex}^\parallel(J_c) \cdot \sin \theta_L = \frac{2}{\pi} \cdot B_{ex}^\perp(J_c) \cdot \cos \theta_L \tag{6}$$

が、テープ線の場合には

$$B_{ex}^\parallel(J_c) \cdot \sin \theta_L = B_{ex}^\perp(J_c) \cdot \cos \theta_L \tag{7}$$

が成り立つ。

Fig. 9 および **Table 2** は線材 No. 1 についての θ_L の計算例である。 J_c - B 曲線には磁界上昇過程を用いた。ある J_c 値における $B_{ex}^\parallel(J_c)$ と $B_{ex}^\perp(J_c)$ とを J_c - B 曲線から求め、式 (6)に代入すると θ_L が求められる。これを全 J_c 値について繰り返して、平均をとると、求める平均配向角度 θ_L が得られる。この例では $\theta_L = 9.3^\circ$ となった。

Fig. 10 に示すように J_c の異なる各種線材の J_c - B 曲線を超電導結晶の c 軸に平行な磁束密度成分の大きさ $B_{\parallel c-axis}$ で整理した。線材長手方向に平行および垂直に磁界を印加して測定した二つの J_c - $B_{\parallel c-axis}$ 曲線はよく一致しており、仮定は妥当であった。また、 J_c が向上するにつれて低磁界側の J_c - $B_{\parallel c-axis}$ 特性が向上している。このことは、低磁界でも大きく J_c の低下する弱接合の減少を意味すると考えられる。

Fig. 10 J_c - B properties of various J_c value. In both $B \parallel L$ (open circle or open square) and $B \perp L$ (closed circle or closed square) cases, normalized J_c is expressed as a function of averaged c-axis component of applied magnetic field $B_{\parallel c\text{-axis}}$.

Fig. 11 Relationship between J_c and longitudinal misalignment angle of crystals θ_L .

Fig. 11 に J_c と平均配向角度 θ_L との関係を示す。 θ_L が減少し、線材縦断面内の結晶配向性が向上するにつれて J_c も向上していることがわかる。

5. 高 J_c の線材の特性

最近、さらに高 J_c の線材が得られた。 **Table 3** に線材の諸元を示す。短尺の線材 No. 5 で $J_c = 2.5 \times 10^8 \text{ A/m}^2$ が、22 m の長尺線材 No. 6 の全長で $J_c = 2.1 \times 10^8 \text{ A/m}^2$ が、50 m の長尺線材 No. 7 の全長で $J_c = 1.6 \times 10^8 \text{ A/m}^2$ (すべて 77 K, 0 T) が得られた。線材 No. 5 のオーバーオール J_c もこれまでの最高値となる $2.7 \times 10^7 \text{ A/m}^2$ (77 K, 0 T) が得られた。線材 No. 7 の I - V 特性を **Fig. 12**

Table 3 Specifications of round strands at 77 K, 0 T.

Sample No.	5	6	7
Matrix	Ag-Mn	Ag-Mn	Ag-Mn
Diameter (mm)	0.890	0.888	0.888
Length (m)	0.05	22	50
Ag/SC ratio	8.2	8.9	8.9
I_c (A)	16.8	12.9	10.1
J_c (10^7 A/m^2)	2.7	2.1	1.6
J_c (10^8 A/m^2)	2.5	2.1	1.6

Fig. 12 I - V property of a 50 m-long round strand. I_c was 10.1 A at 5 mV, corresponding to the 100 $\mu\text{V/m}$ criterion.

Fig. 13 I_c and J_c distribution of a 50 m-long round strand, measured for each 10 m-long section.

に示す。10~100 $\mu\text{V/m}$ の区間から求めた n 値は 18 であった。また、線材 No. 7 の 50 m を 10 m の 5 区間に分けて、それぞれの区間で測定した I_c および J_c の分布を **Fig. 13** に示す。全区間で良好な I_c が得られた。

6. ま と め

Bi-2223 系転位型ケーブル導体用の丸線を開発し、高 J_c 化の指針を得るための線材の基礎特性として、Bi-2223 相の体積分率、 J_c - B 特性、線材横断面内および縦断面内の超電導結晶の配向性を評価した。その結果、Bi-2223 相の体積分率が増大し、配向性・粒接合が向上するとともに J_c が向上していることがわかった。

最近ではさらに高 J_c の線材が得られている。短尺の線材で $J_c=2.5 \times 10^8 \text{ A/m}^2$ (77 K, 0 T) が、50 m の長尺線材の全長で $J_c=1.6 \times 10^8 \text{ A/m}^2$ (77 K, 0 T) が得られた。

参 考 文 献

- 1) 原 築志, 石井英雄: 応用物理 65 (1996) 401
- 2) N. Saga, et al.: Advances in Superconductivity IX, Springer-Verlag, Tokyo (1997) 1341
- 3) J. Fujikami, et al.: Advances in Superconductivity X, Springer-Verlag, Tokyo (1998) 921
- 4) J. Fujikami, et al.: Advances in Superconductivity XI, Springer-Verlag, Tokyo (1999) 903
- 5) S. Mukoyama, et al.: Advances in Superconductivity XI, Springer-Verlag, Tokyo (1999) 1373
- 6) N. Futaki, et al.: Advances in Superconductivity XI, Springer-Verlag, Tokyo (1999) 971
- 7) K. Ohmatsu, et al.: Advances in Superconductivity X, Springer-Verlag, Tokyo (1998) 905
- 8) K. Ohmatsu, et al.: Advances in Superconductivity XI, Springer-Verlag, Tokyo (1999) 817
- 9) S. Hahakura, et al.: Advances in Superconductivity X, Springer-Verlag, Tokyo (1998) 901
- 10) N. Saga, et al.: Advances in Superconductivity X, Springer-Verlag, Tokyo (1998) 893
- 11) K. Ohmatsu, et al.: Advances in Superconductivity XI, Springer-Verlag, Tokyo (1999) 979
- 12) T. Taneda, et al.: Advances in Superconductivity XI, Springer-Verlag, Tokyo (1999) 983
- 13) 種子田賢宏ら: 第61回1999年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集A1-16 (1999) 16
- 14) M. Mimura, et al.: Advances in Superconductivity VIII, Springer-Verlag, Tokyo (1996) 859
- 15) F. Darmann, et al.: Physica C 306 (1998) 75
- 16) F. Darmann, et al.: IEEE Transactions on Applied Superconductivity 9 (1999) 789
- 17) 笹岡高明ら: 第 60 回 1999 年度春季低温工学・超電導学会講演概要集 A1-8 (1999) 8
- 18) 引地康雄ら: 第 61 回 1999 年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集 E2-1 (1999) 156
- 19) T. Kaneko, et al.: Advances in Superconductivity IX, Springer-Verlag, Tokyo (1997) 907
- 20) S. Kobayashi, et al.: Physica C 258 (1996) 336