

鉄道用超電導ケーブルの適用性評価

富田 優* 鈴木 賢次* 福本 祐介*
石原 篤* 赤坂 友幸* 小林 祐介*

Applicability Evaluation of Superconducting Cables for Railway Systems

Masaru TOMITA Kenji SUZUKI Yusuke FUKUMOTO
Atsushi ISHIHARA Tomoyuki AKASAKA Yusuke KOBAYASHI

DC electric railway systems are widely used in Japan, including the metropolitan areas. However, they have some problems, such as limited use of regenerative brakes and energy losses. In order to solve those problems, and to attain the essential energy saving of next-generation electric railway systems, we have been studying the feasibility of applying superconducting power cables to DC electric feeder systems. In this study, we have developed material of superconducting cables for railway systems. The results of material-characteristics evaluation tests, such as an electrical current test of superconducting tapes, are reported.

キーワード：超電導き電システム, 省エネ, 材料開発, 臨界電流

1. はじめに

電気抵抗がゼロで送電できる超電導技術を鉄道用の送電線に適用することで、回生効率の上昇、電力損失の低減、変電所の負荷平準化や集約化、レール電位の抑制などが期待される。

これまで鉄道総研では、超電導ケーブルをき電線に適用することを想定し研究開発を進め¹⁾、超電導線材の製作および特性評価、それらの結果に基づいた超電導ケーブルのプロトタイプを製作し²⁾、各種の特性評価試験を行っている。超電導ケーブルの開発には、コアとなる超電導線材の評価、高特性化が重要な項目であり、本稿では、超電導線材の過電流通電試験や欠陥探知システムの評価など、超電導ケーブルの製作に向けた材料開発について報告する。

2. 鉄道用超電導ケーブルの設計

超電導ケーブル製作時の強度設計を行う上で、超電導線材自体の機械特性の把握が必要不可欠であり、ケーブル巻き線時の機械的応力が臨界電流特性に与える影響の評価を行った。また、超電導き電システムの安全率の設定や費用対効果について検討するために、検討に必要な超電導線材の基礎特性および過電流特性について測定を行った。

2.1 超電導線材の臨界電流特性^{3) 4)}

機器設計やシミュレーションの基礎的データとして長尺線材の諸特性を、特に機器設計上重要な液体窒素温度領域について詳細に調べた(図1)。Bi (ビスマス)系線材とY (イットリウム)系線材において、0~1 Tでの垂直磁場と並行磁場の臨界電流(I_c)に与える影響について評価を行った。Bi系線材では、並行磁場に対しては臨界電流の低下はあまり見られないが、垂直磁場により臨界電流値が低下することが明らかになった。またY系線材では、垂直磁場と並行磁場による臨界電流の挙動はほとんど同じものであった。この結果から、液体窒素温度下のI_cを把握することができるため、ケーブルの電流容量に必要な線材の本数を予測することができる。

また、局所特性評価手法として、磁気プローブにより試料磁界が検出可能な磁気顕微鏡による非接触の臨界電流密度(J_c)評価手法を検討した。この手法はBi系線材においても評価可能であることを明らかにし、ケーブルでの適用において欠かせない線材長手方向の均一性について非破壊で評価を行った(図2)。その結果、超電導線材内の1mm未満の欠陥を抽出でき、5桁以上の空間スケールにわたるJ_c分布を評価・解析することにより、局所的なJ_c低下部位の頻度を明らかにした。この評価方法は、特に長尺ケーブルの作製過程において有効であると考えられる。

* 材料技術研究部 超電導応用研究室

特集：材料技術

2.2 超電導線材に与える変動電流の影響⁵⁾

き電線に超電導を適用した場合、直流き電の場合においても、

- (i) き電区間への列車の進入，離脱に伴う電流急変
- (ii) 列車の力行，惰行の切り替わりに伴う電流急変

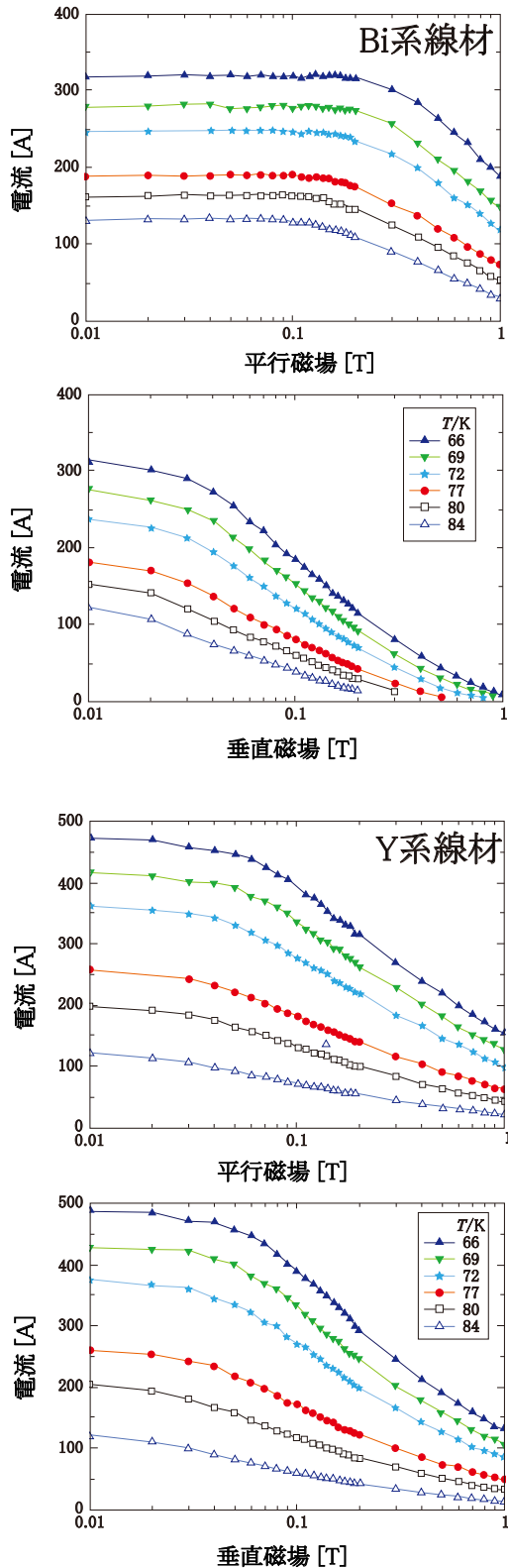


図1 超電導線材の磁場中臨界電流特性

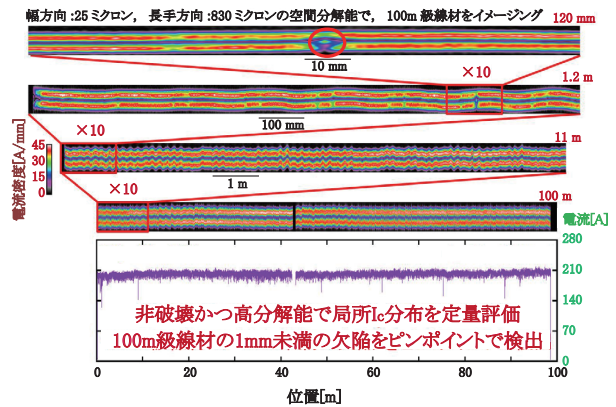


図2 100m長 Bi系超電導線材の局所特性評価

表1 超電導線材の解析条件

断面	0.4 mm × 0.02 mm (アスペクト比 20)
臨界電流	3 A

(iii) 電力変換装置により発生する高調波電流に起因して、交流損失が発生する。そこで表1に示す条件で、数値電磁界解析を用いこのような状況下での超電導線材レベルの交流損失の大きさの評価を行った。なお、臨界電流密度は標準的な値に保ちつつ、線材寸法は縮小して解析を行った。

まず、(i)，(ii)に関して、台形状の波形の電流を流し、電流がゼロから一定値に上昇する際と、一定値から零に下降する際の交流損失を評価した。計算は、電流上昇・下降時間を1ms から 1000ms まで変化させて行った。

図3に I_c の2乗で規格化した線材単位長さあたりの損失エネルギーを電流上昇・下降時間に対してプロットした。電流立ち上げ前と、電流立ち下げ後では、平均電流はゼロであるものの電流分布は異なっている。すなわち今回の解析では、電流立ち上げ前は電流密度が至るところゼロである状態を初期状態としたが、電流立ち下げ後は、線材内には電流密度が正の部分と負の部分が存在

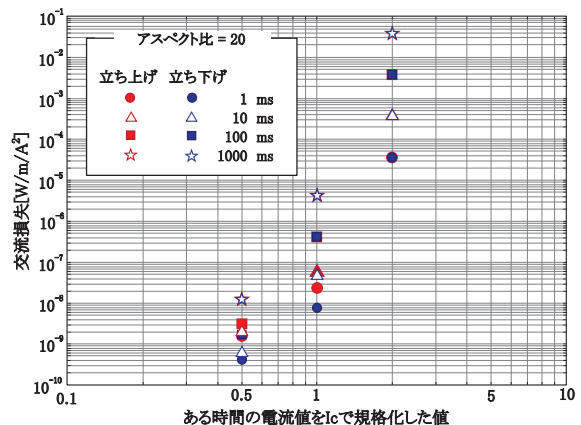


図3 超電導線材の電流変化時における交流損失

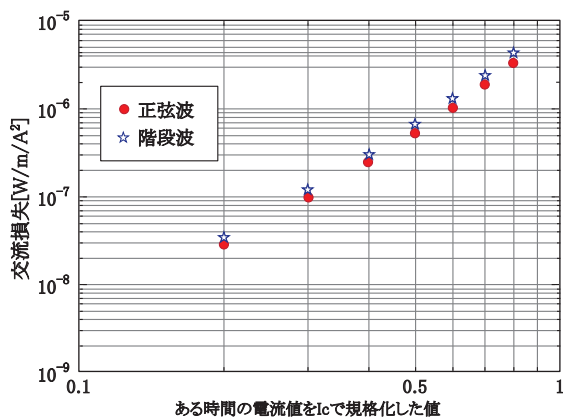


図4 正弦波と階段波における交流損失の比較

している。このため、立ち上げ時と立ち下げ時の交流損失は異なっている。また、立ち上げ時間、立ち下げ時間を長くしていくと、単に磁束の侵入過程でのピン止め損失以外に、定常的に超電導体という非線形抵抗体に電流を流していることによるエネルギー散逸が増えるので、損失も増えていくことに注意を要する。

(iii) に関しては、高調波電流を含んだ電流波形として、階段状の周期波形を仮定し、交流損失を評価した。正弦波電流に対する交流損失と階段波電流に対する交流損失を電流負荷率に対してプロットし比較した結果を図4に示す。階段波電流に対する交流損失の方が若干大きいですが、差はそれほど大きなものではない。鉄道の整流器を考慮した300 or 360 Hz (6パルス) や600 or 720 Hz (12パルス) のリップルに関しては今後検討する予定である。

2.3 超電導線材に与える過電流の影響

超電導ケーブルに定格電流を超える過電流が流れた際に過剰な電圧が発生しないように、安全率の設定を行った。サージ電流発生時の電流値は、直流遮断器の仕様を参考に50kA、100msecとした。サージ電流発生時に超電導層が焼損しないように銅保護層を設計したところ、断面積で約45mm²以上必要であることが分かった。銅保護層は、超電導層と隣接して銅テープを巻線するか、フォーマと超電導層を電気的に接続して設計しなければならない。焼損前の領域においても、線材から気泡が発生する現象が存在し(図5)、この気泡(特に初気泡)が超電導層間の絶縁を低下させる恐れがあるため、超電導ケーブルを冷却する際には液体窒素を過冷却で使い、気相が存在しないような状態で扱う必要がある。

JIS H7305 臨界電流の試験方法を参考に、電流掃引速度を6A/sと設定したが、サージ電流には様々な形が想定されるため、電流掃引速度を変化させ、電流-電圧特性への影響を検討した。図6に電流掃引速度変化時の電流-電圧特性を示す。掃引速度が速いほど図6のピークとしてあらわれるオーバーシュート発生が遅く、発生電

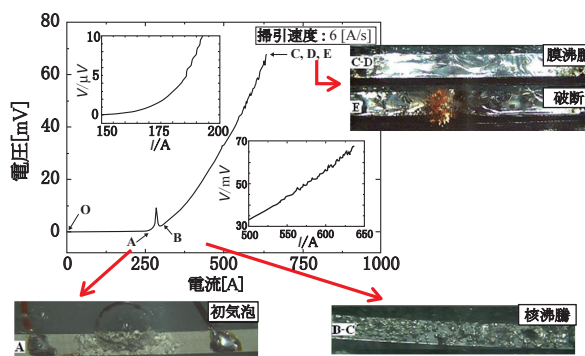


図5 過電流が流れた際のBi系超電導線材の挙動

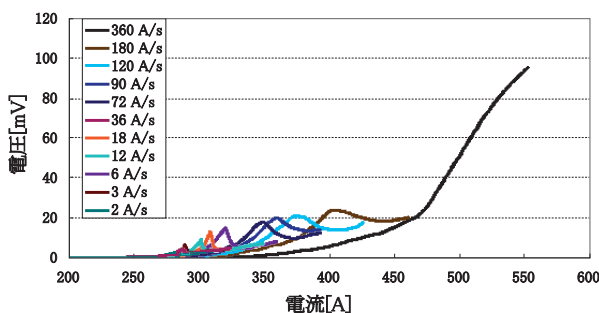


図6 電流掃引速度を変化させた場合の電流-電圧特性

圧値が比較的高いことが確認できた。

これは線材の発熱が液体窒素の冷却の限界を上回った後、発泡までの間に電流値が上昇したため、このようにオーバーシュート発生電流値が変化したと考えられる。6A/sより遅い場合、立ち上がりの電流値の変化はほぼ同じ傾向であった。これは冷却が充分に行われており、冷却限界から脱するタイミングが同じであるためと考えられる。

また、冷媒となる液体窒素が超電導線材の冷却にどの程度効果的か検討を行った。I_c以下では液体窒素による冷却が支配的であるが、液体窒素の沸騰は伝熱面と液面の温度差が発生するために起こり、沸騰はサンプルの発熱が液体窒素による冷却を上回るために起こる現象と考えられる。そのため、I_cからオーバーシュート発生までの間に超電導線材による発熱と液体窒素による冷却の逆転が起こると考えられる。そこで定電流法で1分間通電を行うことで、超電導線材の発熱が液体窒素の冷却を上回る電流値を明らかにした。図7に沸騰が発生した場合と発生しない場合および液体窒素の冷却の時間-電力特性の比較を示す。図7より、測定開始して暫くしてからオーバーシュートが発生していることが確認できた。このときに沸騰時の挙動として初気泡が発生し、その後は核沸騰を続けることを確認した。図7より、沸騰が開始した場合において、沸騰が起きない場合よりも発熱が少なく、波形も安定していることを確認した。これは核沸騰領域では安定して発泡し、それによる対流が安定する

特集：材料技術

ため波形に乱れが無く、液体窒素による冷却よりも気化熱による冷却が大きいことに由来して、発熱が低下しているためと考えられる。

図7では、15.2sにおいて沸騰を確認し、そのときの電流値は約270Aであった。しかし同じ電流値でも沸騰現象が起きる場合と起きない場合があり、これは電力が安定しておらず、電力による発熱が冷却限界を越えた時のみ沸騰が発生し、冷却限界以内の発熱であった場合は沸騰が発生しないためであると予想される。よって核沸騰が生じない最大の発熱が液体窒素の冷却限界であると考慮されるため、図7より1.36Wが液体窒素で冷却可能な発熱であると考えられる。

次に初気泡発生点について考察を行った。初気泡の発生は電圧上昇に影響をあたえたと予想され、電圧上昇の変化の生じた場所で初気泡が発生したと考えた。そこで15.2sで発熱の傾きに変化が起き、なおかつ冷却開始までが初気泡の離脱までの時間とほぼ同程度であることから、ここで初気泡が発生したと考えられる。以上より沸騰開始までに発生する熱量を考えた結果、図7において1.36Wを越える範囲で、14.6sから15.2sまでの面積が線材の熱量なので、約0.32Jが発泡開始までに発生した熱量であると考えられる。よって線材温度は、液体窒素の冷却が支配的であり77Kと考えられるため、超電導線材の大部分を構成する銀の比熱232J/kgKより、約5K上昇したと考えられる。

この急激な温度上昇は、超電導線材の発熱が液体窒素の冷却量を上回り、液体窒素の冷却が支配的であるときには発生しないが、温度上昇による抵抗値の上昇が起きると、抵抗上昇による温度上昇が発生して、互いに干渉することにより急激に発熱が生じると予想される。しかし直後の初気泡の気化熱により線材は冷却され、核沸騰により熱流束が増大した液体窒素による冷却が支配的になると考えられる。この時の熱流束はおおよそ0.6W/cm²となり、Kutateladzeの式(1)より、線材温度は約80K程度と予想できる。この温度推移の傾向を参考に、超電導ケーブル内部の線材の電流特性を把握することで、超電導ケーブルの設計を行うことができる。

$$\left(\frac{q_w}{\Delta T k_L} \frac{l_i}{l_i}\right) = 7.0 \times 10^{-4} \left[\frac{(q_w / L \rho_v) l_i}{\nu_L} \right]^{0.7} Pr_L^{0.35} \left(\frac{p}{\sqrt{\sigma g_0 (\rho_L - \rho_v)}} \right)^{0.7} \quad (1)$$

- ΔT: 温度差 [K]
- σ: 液体の表面張力 [kg/s²]
- ρ_L: 液体の密度 [kg/m³]
- ρ_v: 飽和水蒸気の密度 [kg/m³]
- k_L: 液体の熱伝導率 [kcal/m h deg]
- L: 蒸発線熱 [kcal/kg]
- ν_L: 液体の動粘性係数 [m²/h]
- Pr_L: 液体のプラントル数 [無次元]

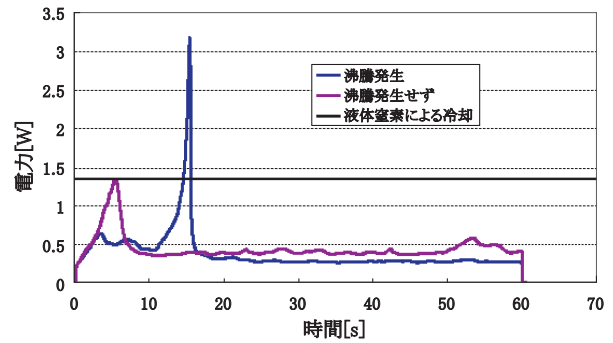


図7 沸騰発生時と非発生時および液体窒素による冷却の時間－電力特性の比較

- p: 系の圧力 [kg m s⁻²]
- q_w: 熱流速 [W/m²]
- g₀: 標準重力加速度 9.81[m/s²]

2.4 超電導線材の高度化^{6) 7) 8)}

Bi-2223線材のI_c向上の指針を考える上で欠かせない多芯線材中部のフィラメントをどのように電流が流れているかについて検討した。

Bi-2223相における(001)面配向の差に着目して観察した結果を図8に示す。走査電子顕微鏡(SEM)像で暗く見えている不純物相が多く分布するフィラメント中央部では、不純物が相対的に少ない銀シース付近に比べて、Bi-2223相の(001)面配向度が低いことがSEMを用いた後方散乱電子回折(EBSD)により明らかとなった。Bi-2223の臨界電流は磁場の印加方向と(001)面の向きに強く依存することが薄膜の研究などからわかっており、不純物の存在による(001)面の曲がりや臨界電流を低下させていると示唆される。さらに、フィラメント中央部と銀シースとの界面付近でのBi-2223結晶粒の配向の違いを明らかとするために行った透過電子顕微鏡(TEM)像を図9に示す。フィラメント中央部では銀シース付近に比べると層状構造が不連続な領域(矢印)や、層状構造の向きが不連続に変化する領域が多く認められる。こうした領域が超電導電流の障害箇所であると予想される。このため、フィラメント中央部は超電導電流経路への寄与が小さい(殆ど無い)と予想される。一方で、銀シース界面付近の結晶の配列に乱れの少ない部分が電流運搬を担っていると考えられる。このような結晶の配列に乱れの少ない部分は銀シース界面から1~2μm程度の厚みで存在しており、その厚みはフィラメントの厚みに依存するわけではなかった。

Bi-2223線材では有効な電流パスが限られているとの知見を踏まえると、高性能実現のための線材製造プロセスを考案していくには、高度配向化、緻密化、残存不純物相低減によって有効電流経路の割合を増大させること

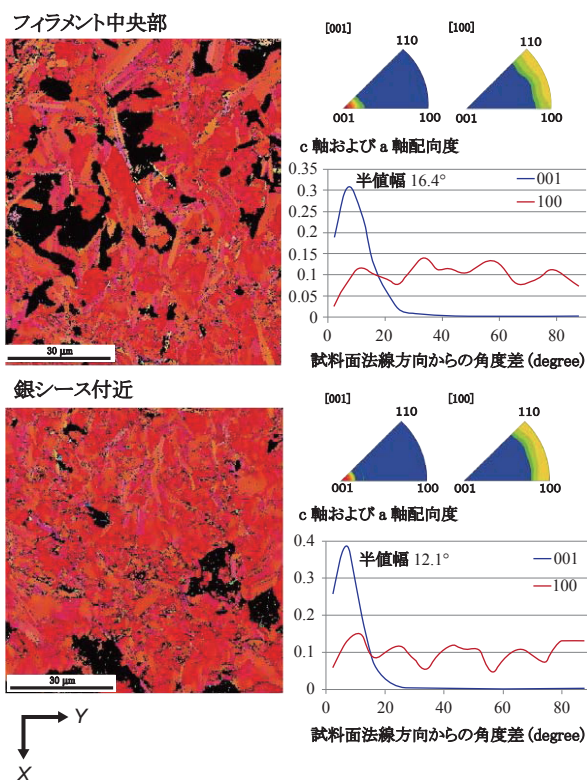
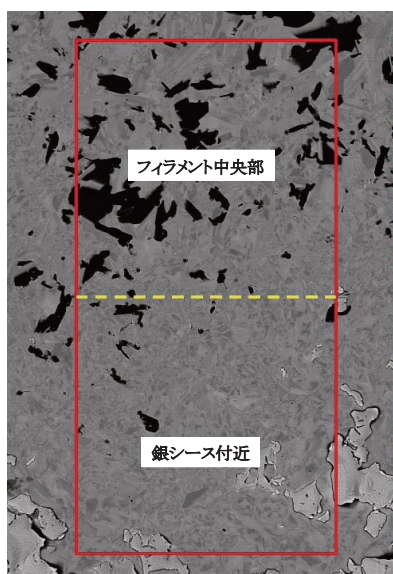


図8 線材フィラメントの二次電子像(上), フィラメント中央部と銀シース付近における結晶方位マッピング(左下), c軸(001)とa/b面における(100)試料面法線方向からの角度差(右下)

が基本的な方向となる。

2次焼成後の還元後熱処理は、これまで金属組成比を定比であるBi:Sr:Ca:Cu = 2:2:2:3に近づけ、 T_c の上昇とともに超電導凝縮エネルギーの増加を介して線材の I_c 上昇につながると解釈されていた。Bi-2223焼結体に対して行った研究からは、還元アニールの新たな効果が見つかった。無配向のBi-2223焼結体に対して、720℃、

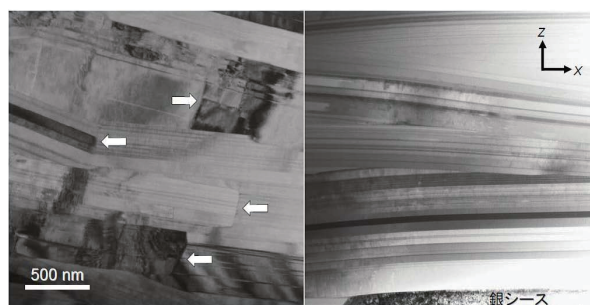


図9 線材フィラメントのTEM像(左:フィラメント中央, 右:銀シース付近)

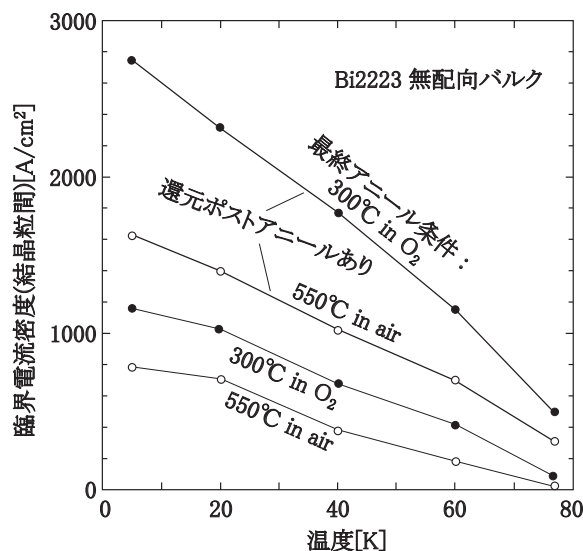


図10 残留磁化法により測定した無配向Bi-2223結晶粒間の臨界電流密度の温度依存性

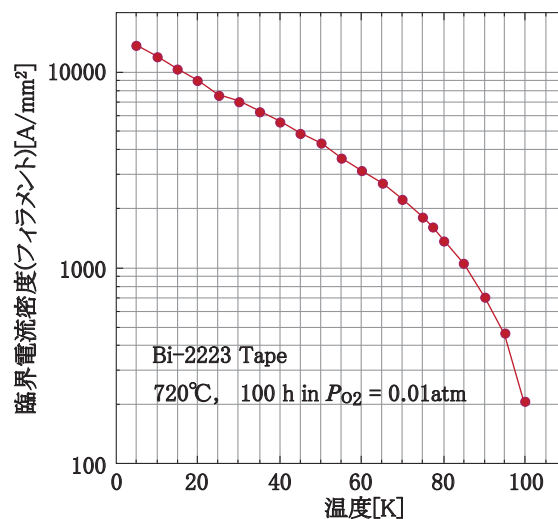


図11 Bi-2223線材の J_c の温度依存性

酸素分圧0.01atmで100時間アニールを行う過程を加えたところ、Bi-2223結晶内の J_c はほとんど変化しないものの、図10に示したように結晶粒間の J_c が著しく改善し(77Kでは6倍)、この効果はキャリアのオーバードープ状態により顕著であることがわかった。無配向の焼結

体ではc軸の方位が揃った粒界は少なく、還元アニールの追加によって結合角の大きな粒界のJcが改善されたと考えられる。実際のBi-2223多芯線材においても配向組織が不十分な領域が広いことから、還元アニール条件およびキャリアドープ状態の最適化によるIcの向上が期待できる。この720℃、酸素分圧0.01atmで100時間アニールを行う過程を市販線材に加えて評価したところ、図11に示すように、フィラメントサイズから見積もったJcが約1500 A/mm² (77K)であることがわかった。フィラメント全体のJcが通電法によるJcよりも2～3倍高いのは、通電パスにならない部分も磁化に現れることと、自己磁場が通電Jcを下げるためだと考えられる。

3. おわりに

超電導ケーブルをき電線に適用することを目的に、超電導ケーブルのコアとなる超電導線材の特性評価を行った。超電導線材の過電流や変動電流の評価から、電流通電時の線材の挙動を把握することができた。さらに、局所特性評価手法として磁気顕微法による非接触Jc評価手法を検討し、局所的なJc低下部位を特定できるこの手法は、長尺ケーブルの作製過程において有効であることを見出した。

現在は、これらの結果を踏まえて、鉄道向けの超電導ケーブルを製作し、鉄道総研構内試験線での各種実証試験を進めている。評価試験と並行し、実路線を対象としたシミュレーションによる確認を進めており、実証試験の結果と合わせて導入効果について明らかにし、鉄道事業用として適用可能な超電導ケーブルの実現を目指していく。

謝辞

本研究の一部は、(独)科学技術振興機構(JST)の「戦略的イノベーション創出推進プログラム(S-イノベ)」の支援を受けて実施している。

文献

- 1) 富田 優, 他: 鉄道き電線用の超電導ケーブルの試作, 低温工学・超電導学会概要集, Vol.80, p.181, 2009
- 2) 富田 優, 他: 鉄道用超電導ケーブルの要素技術の構築, 鉄道総研報告, Vol. 26, No. 12, p 45, 2012
- 3) Kitaguchi et al.: "Liquid nitrogen cooling Bi-2223 magnet (0-1.2T for 106 mm bore) with variable temperature insert", ICEC24-ICMC2012.
- 4) Fukumoto et al.: "Characterization of HTS wire for railway system", Abstracts of CSSJ Conference 86 (2012) 101.
- 5) Higashikawa et al.: "Characterization of Nonlinear Current Transport Properties in High Temperature Superconducting Wires for the Design of Innovative Magnet Applications", 2011 International Workshop on Advanced Electrical Engineering and Related Topics.
- 6) Hata et al.: "Electron microscopy observation of Bi-2223 tape fabricated by a controlled overpressure process", ICEC24-ICMC2012.
- 7) Shimoyama et al.: "Grain Boundary Engineering by Post Annealing for Cuprate Superconductors", MRS2012 Spring Meeting.
- 8) Tajima et al.: "Formation of Bi(Pb)2223 phase by sintering in a short time under low partial pressure of oxygen", ICEC24-ICMC2012.