

高温超電導線材通電特性試験装置の開発

小方 正文* 長嶋 賢* 宮崎 佳樹*
 岩松 勝** 柳瀬 康人*** 山下 知久***

A Properties Measuring System for HTS Wires

Masafumi OGATA Ken NAGASHIMA Yoshiki MIYAZAKI
 Masaru IWAMATSU Yasuto YANASE Tomohisa YAMASHITA

Twenty years have passed since the discovery of the phenomenon of high-temperature superconductivity. Studies have now shifted away from basic research and are focusing on the field of application. At the same time, remarkable progress has been in the field of high-temperature superconducting (HTS) wires made of rare earth (RE) coated materials featuring high values of critical current in the environment where the temperature is higher and the magnetic field is stronger than ever. In this context, Railway Technical Research Institute (RTRI) has started a study on the application of RE coated wires to HTS magnets for the MAGLEV system. In this study, it is important to examine thoroughly the properties of the wire usable and reflect them in the design of superconducting magnets. Therefore, the authors have developed an HTS wire testing-device to evaluate the conductivity characteristics of HTS wires in detail under arbitrary temperature and magnetic field conditions.

キーワード：高温超電導，線材，通電特性，RE，HTS，SCM

1. はじめに

超電導技術は、既存の技術では実現困難な飛躍的性能向上をもたらす可能性があること、また省エネルギー、環境負荷低減の観点からも、様々な技術分野において注目されている。その中で、従来よりも高い温度で取り扱いが可能となることで大きな期待を集めてきた高温超電導技術は、発見から20年が経過し、いよいよ送電ケーブル、変圧器、モーター等への応用展開が始まっている。これは、コイル等機器応用の素材となる高温超電導線材の製造技術が向上し、近年になって実用レベルの性能を有する線材が供給されるようになったためである。当初開発されたビスマス (Bi) 系線材は、臨界温度 (Tc) が -163°C (110 K) と高いものの、磁場中で使用すると通電特性が大幅に低下することや、機械的強度の向上、コスト低減等の課題が残された。その後これらの課題を解決する可能性を持った線材、いわゆる次世代高温超電導線材として、イットリウム (Y) 等の希土類 (RE) 元素を用いた線材 (RE 系線材) が開発された。RE 系線材は、従来の金属系線材よりも高い Tc (90 K) を有し、Bi 系線材よりも高温・高磁場中における通電特性に優れ、機械的強

度やコストの点でも有利な構造上の特徴を有している。

鉄道総研はこのような RE 系線材の特性に着目し、RE 系線材を磁気浮上式鉄道用超電導磁石に適用する検討を行っている。現在も RE 系線材の世界的な性能向上競争が進む中、我々は本検討を着実に進展させるための手段として、高温超電導線材通電特性試験装置を開発した。

2. 背景

2.1 RE 系線材の磁気浮上式鉄道用超電導磁石への適用検討

RE 系線材の磁気浮上式鉄道用超電導磁石への適用検討によれば^{1) 2)}、RE 系線材は、高温・高磁場中においても、臨界電流密度 (Jc) (超電導材料単位断面積当たりの臨界電流 (Ic) 値) が大きいので、例えば超電導磁石の運用温度を従来の 4.2 K から 50 K 程度まで上げることによって、次のようなメリットが想定されている (図1)。

- (1) 材料の熱容量が増大するため (例えば 50 K の銅は 4 K のときよりも約 1000 倍大きくなる)、熱擾乱に対する超電導コイルの安定性が飛躍的に向上する
- (2) 小型・軽量で省電力な冷凍システムを構成できる
- (3) 輻射熱シールド板等の断熱構造を簡略化できる

このように、RE 系線材の適用により、構造が簡素化された信頼性の高い超電導磁石を構成できる可能性が示さ

* 浮上式鉄道技術研究部 (低温システム)

** 企画室 (企画)

*** 株式会社東芝 (府中事業所)

特集：浮上式鉄道技術とその応用

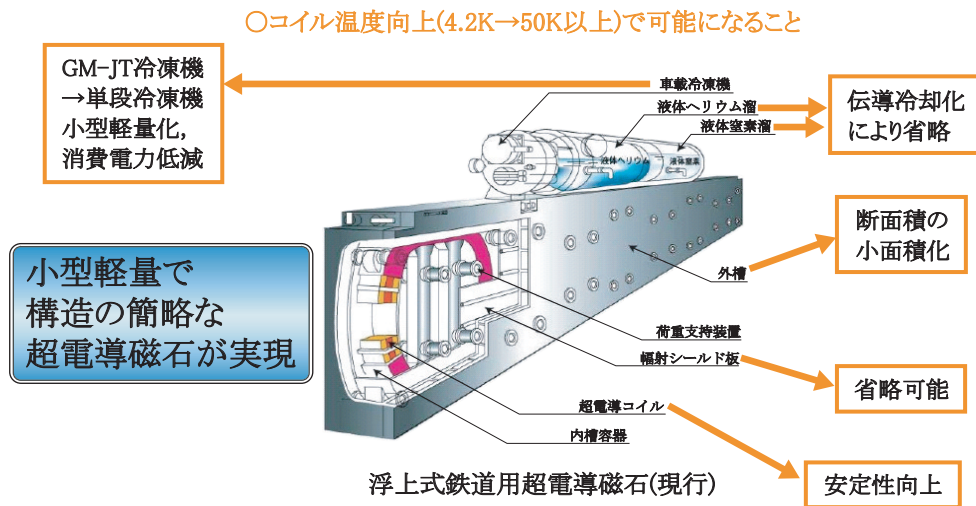


図1 RE系線材適用のメリット

れたが、具体的検討のためには、実際の使用環境（電流、磁場、温度、コイル形状）下での、RE系線材の通電特性を詳細に確認する作業も必要であることがわかった。

2.2 RE系線材の構造

図2に示すとおり、RE系線材は多層構造を有することが特徴である³⁾。線材のベースとなるのが基板材料で、厚さ100 μm 程度の金属テープからなり、線材の機械的強度を担っている。そして、それぞれ数 μm の厚さで中間層、超電導層、安定化層が精密に成膜積層され、最終的に銅等の金属で全体がラミネート加工されて、幅が数mm～10mm程度、厚さが0.1～0.2mm程度のテープ状の線材となる。

このように、RE系線材の超電導層は断面アスペクト比が極端に大きく、また超電導層自体が高度に配向した結晶構造であるため、磁場（B）を印加したときの通電特性に大きな異方性が現れることが知られている。図3のよう

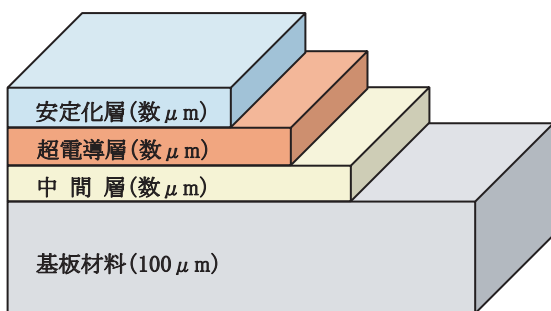


図2 典型的なRE系線材の構造

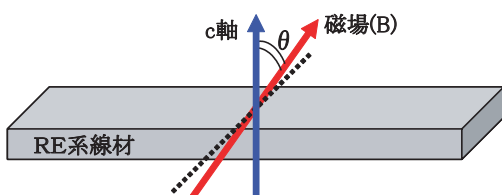


図3 超電導層のc軸と磁場（B）がなす角度 θ の定義

に、テープ状線材の平面と直交する向きを超電導層のc軸と呼ぶが、Bがc軸となす角度を θ とすれば、 $\theta = 90^\circ$ （B \perp c軸）のときに通電特性が最大となり、 $\theta = 0^\circ$ （B//c軸）に近づくにつれて特性が劣化していく。この異方性の問題は従来の金属系線材にはない特性であり、RE系線材の適用検討にあたっては、特に詳細な確認作業が必要である。

3. 高温超電導線材通電特性試験装置

3.1 試験体系と装置構成

これらRE系線材の通電特性確認要求を満足するためには、次の項目を条件とする試験体系が必要である。

- (1) 電流（I）
- (2) 磁場（B）
- (3) 磁場角度（ θ ）
- (4) 曲げ直径（ ϵ ）
- (5) 温度（T）

そこで、表1に示す3通りの試験装置および試験条件の組合せからなる構成を設定し、それぞれに対応できる試験装置を製作した。各装置の概要を次に述べる。

表1 高温超電導線材通電特性試験装置の構成

試験装置	試験条件					備考
	I	B	θ	ϵ	T	
1	I-B	○	○			液体窒素冷却 (T=77K)
2	I- ϵ	○			○	液体窒素冷却 (T=77K)
3	I-B- θ -T	○	○	○		○

表2 I-B 試験装置の主要性能

電流 (I)	0 ~ 1000 A
磁場 (B)	0 ~ 0.5 T (永久磁石使用)
磁場角度	$\theta = 0^\circ$ 固定
温度	T= 77 K 固定 (液体窒素浸漬冷却)

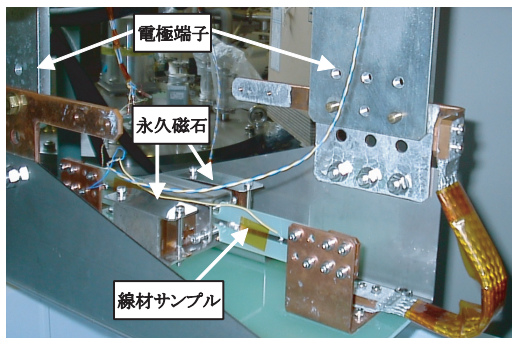


図4 I-B 試験装置

3.2 I-B 試験装置

本装置は、低磁場環境における高温超電導線材のIc特性を把握することを目的としている。また、磁場発生源に永久磁石を用いており、次に述べるI-ε試験装置と同様、装置全体を液体窒素の中に浸漬して冷却するので、線材の基礎特性を簡便に取得できることが特徴である。

本装置の主要性能を表2に、外観を図4に示す。線材の両面に設置した永久磁石の間隔により磁場強さの調整が可能であり、最大磁場は0.5 Tである。磁場角度はIc特性に対する異方性の影響が最も顕著に現れる $\theta = 0^\circ$ に固定した。また液体窒素浸漬冷却のため、温度も77 Kに固定される。

3.3 I-ε 試験装置

本装置は、曲げ変形が与えられたときの高温超電導線材のIc特性を把握することを目的としている。例えば、高温超電導線材をコイルに応用する場合、線材自らが発生する磁場の他に、コイル化に伴う曲げ変形がIc特性を劣化させる要因となりうるため、本装置により曲げ変形の限界を把握することが重要である。

本装置の主要性能を表3に、外観を図5に示す。曲げ設定用治具(取り外し交換可能な半円形状を有する絶縁部材)に線材を沿わせて固定することにより、必要な曲げ直径(最小10 mm)を線材に設定することができる。また、図2のように、RE系線材は表裏非対称の多層構造をしているため、線材を曲げる向きにより、超電導層に発生する歪みの様相が異なる。すなわち、超電導層が内側の場合は圧縮歪み、外側の場合は引張歪みとなるので、曲げ直径だけでなく、曲げ方向も含めた特性把握が重要である。液体窒素浸漬冷却のため温度は77 Kに固定、また通電時に線材自らが発生する自己磁場を除き、印加磁場は無しとした。

表3 I-ε 試験装置の主要性能

電流 (I)	0 ~ 1000 A
曲げ直径 (ε)	10 mm ~ (半円形状曲げの直径)
磁場	B= 0 T (自己磁場のみ)
温度	T= 77 K 固定 (液体窒素浸漬冷却)

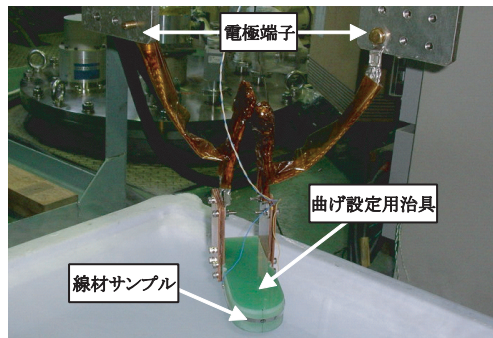


図5 I-ε 試験装置

3.4 I-B-θ-T 試験装置

本装置は、高温超電導線材の温度を任意に設定でき、高磁場発生が可能で、かつ線材への磁場印加方向も可変な性能を有しており、磁場の大きさ、磁場の方向、温度をパラメータとしたときの線材のIc特性を総合的に把握することを目的としている⁴⁾。

本装置の主要性能を表4に、外観を図6、模式図を図7に示す。磁場発生用超電導コイルの室温ボア空間(直径

表4 I-B-θ-T 試験装置の主要性能

電流 (I)	0 ~ 1000 A
磁場 (B)	0 ~ 5.5 T (超電導コイル使用)
磁場角度 (θ)	0°, 30°, 45°, 60°, 90°
温度 (T)	10 K ~ (冷凍機伝導冷却)



図6 I-B-θ-T 試験装置

特集：浮上式鉄道技術とその応用

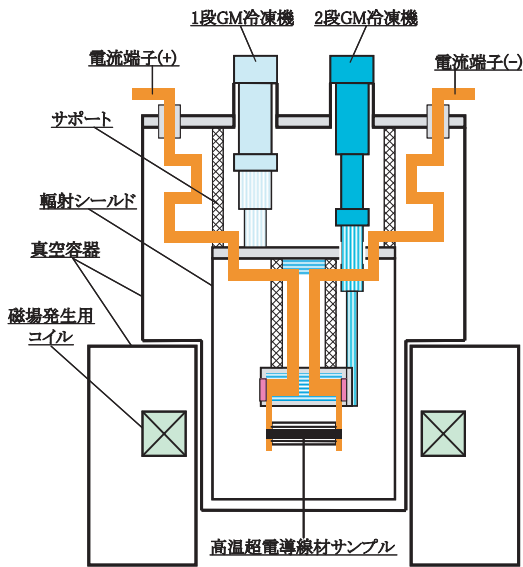


図7 I-B-θ-T試験装置（模式図）

400 mm)へ線材サンプルを収納した真空容器先端部を挿入する構成とし、線材サンプルは多角形断面のFRP製サンプルホルダに取り付け、鉛直方向の外部磁場とサンプルホルダ軸が直交するようにして装置へ固定する。そして、線材Icの異方性確認のため、サンプルホルダは軸を中心に回転可能で特定角度にて固定することができる。外部磁場は、磁気浮上式鉄道用超電導磁石の磁場環境を考慮し⁵⁾、磁場発生源に超電導コイルを用いることで最大5.5 Tまでの強磁場を発生できるようにした。なお、超電導コイルの発生する磁場が冷凍機の駆動部へ悪影響を与えないよう、冷凍機コールドヘッドとサンプルホルダとの間に熱伝導性能の良好な伝熱板を挿入して接続することで、超電導コイルと冷凍機駆動部との距離を確保している。線材サンプル温度は、2段GM冷凍機による伝導冷却とヒータ制御により最低温度10 Kまでの任意温度設定を可能とした。線材サンプルを室温から10 Kまで冷却するのに要する時間は約12時間である。

4. 試験結果

4.1 線材サンプル

RE系線材は、世界中の研究機関、線材メーカーにおいて研究開発が進められており、将来一層の性能向上が期待される。よってRE系線材を浮上式鉄道用超電導磁石へ適用するためには、高性能化された線材の登場を待つだけでなく、積極的に、現状の線材の実力を確認して、随時、検討にフィードバックする作業が有効である。そこで、一般向けに市販されている代表的なRE系線材から2サンプル(表5)を用いて、高温超電導線材通電特性試験装置により各種試験を実施した。

表5 高温超電導線材通電特性試験に用いたRE系線材サンプル

名称	線材幅 × 線材厚さ (mm)
サンプルA	4.4 × 0.2
サンプルB	4.0 × 0.1

4.2 I-B試験結果

図8に、液体窒素温度77 KにおけるIcの磁場依存性を示す。両サンプルとも、磁場の増大に従いIcが単調減少するものの、減少傾向の違いが認められる。本結果より、通電性能を線材単体のIcと比較すれば、外部磁場のない環境ではサンプルBが、外部磁場のある環境ではサンプルAが優れていることを確認した。

また図9には、各線材の単位断面積当たりの臨界電流値である工学的臨界電流密度(Je)の磁場依存性を示す。線材を機器に応用する場合、使用する線材のIcの検討だけでは十分でなく、Icに対して線材の実断面積を考慮した量であるJeの検討が重要となる。例えば、線材でコイルを巻く場合に、Icが大きいという理由で選択した線材の断面積が相対的に大きいものであったとすると、巻線サイズの大型化、コイル重量増大を招き、実用的なコイル構成が難しくなるケースも考えられる。結局、機器応

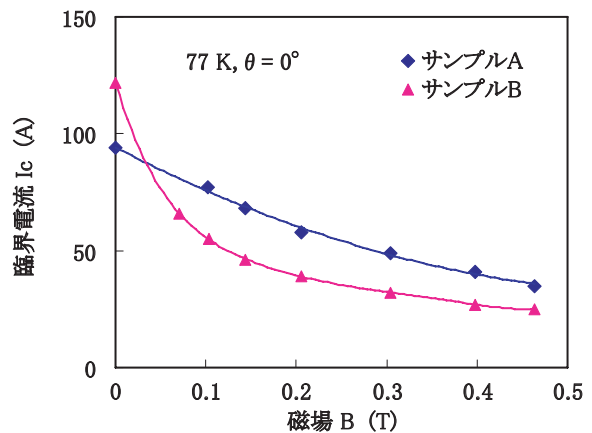


図8 臨界電流の磁場依存性 (I-B 試験結果)

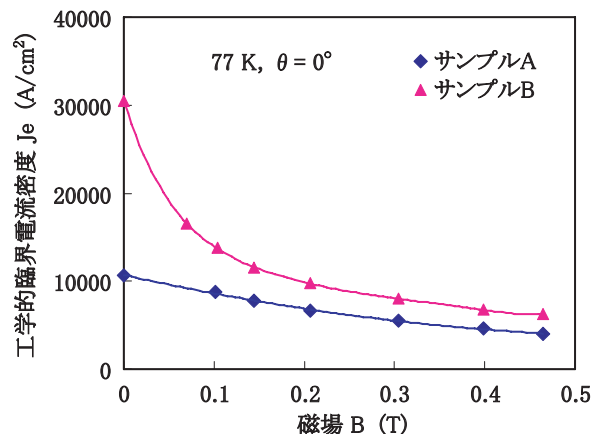


図9 工学的臨界電流密度の磁場依存性 (I-B 試験結果)

用の観点からはJeの大きな線材であることが重要なのであり、機器のコンパクト化にもつながる。よって、77 K、0.5 Tまでの条件において機器応用に適するのは、Je特性の良好なサンプルBであることがわかる。

なお以下に述べる試験結果では、サンプル線材単体の特性比較、特性確認の実施例として、Ic特性のみを扱うこととする。

4.3 I-ε 試験結果

図10に、77 K、自己磁場におけるIcの曲げ直径依存性を示す。図中の実線はサンプル線材の超電導層を内側にしたときの値、同じく点線は外側にしたときの値を示している。また、Icに不可逆的な劣化をもたらす曲げ直径量を確認するため、曲げ直径の大きい方から小さい方へ、曲げ、直線、曲げ、直線と交互に線材を変形させてIcを取得している。

本結果より、サンプルBは、曲げ直径φ = 10mmまでの範囲でIc劣化は発生しないこと、また、サンプルAは、φ = 20 mmまでの範囲ではIc劣化は認められないが、超電導層外側の条件ではφ = 10mmでIcの不可逆的劣化が発生し、同内側の条件ではφ = 10mmでIcの低下傾向が見られるものの曲げ変形除去によりIcが元の値まで回復することを確認した。よって、曲げ変形に対するIc特性が良好なのは、サンプルBの方であり、線材の機器応用にあたっては、サンプルBであればφ = 10 mm以上、サンプルAであればφ = 20mm以上を保持する必要があることがわかった。またサンプルAにおいて、超電導層内側と外側との結果に差が生じたのは、線材内部構造の非対称性に加え、線材厚さが比較的大きいことが影響し、圧縮歪みあるいは引張歪みを受けるときの超電導層の状態の違いが顕著に現れたためと推測される。

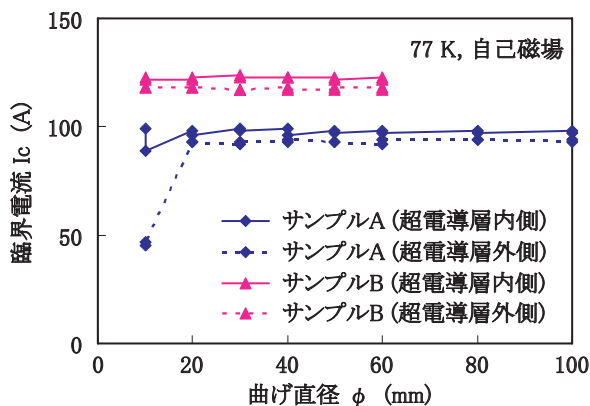
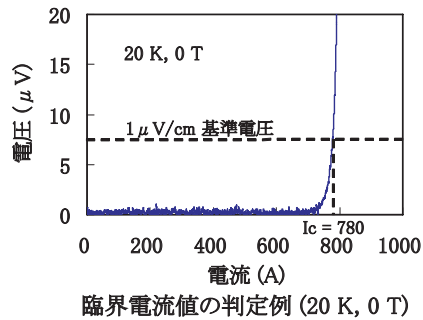


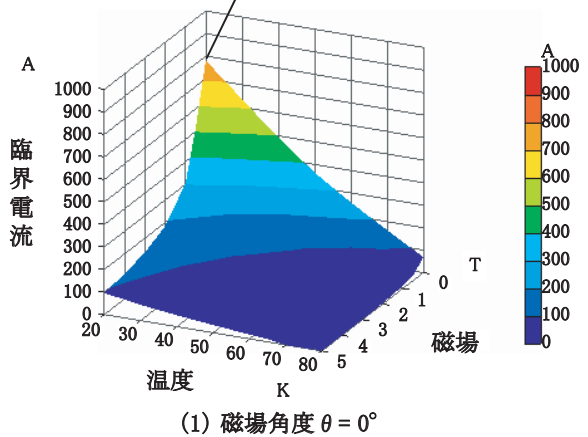
図10 臨界電流の曲げ直径依存性 (I-ε 試験結果)

4.4 I-B-θ-T 試験結果

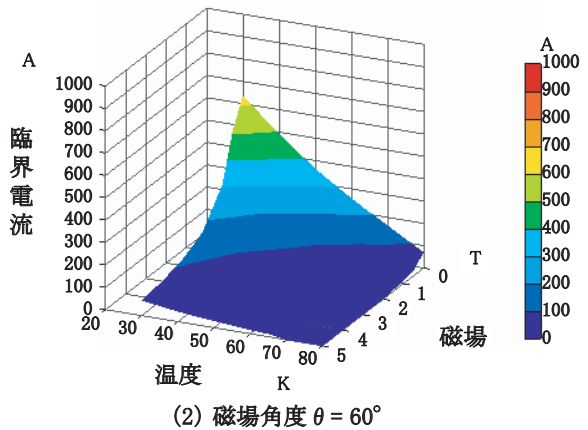
図11に、サンプルAを用いたときのIcの温度・磁場依存性を、設定磁場角度(θ = 0°, 60°, 90°)毎に示



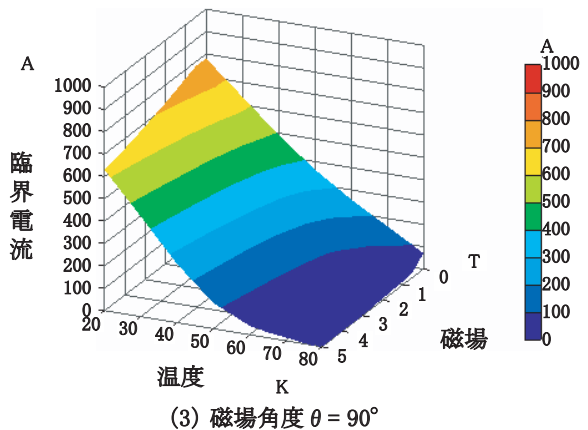
臨界電流値の判定例 (20 K, 0 T)



(1) 磁場角度 θ = 0°



(2) 磁場角度 θ = 60°



(3) 磁場角度 θ = 90°

図11 サンプルAの各磁場角度における臨界電流の温度・磁場依存性 (I-B-θ-T 試験結果)

特集：浮上式鉄道技術とその応用

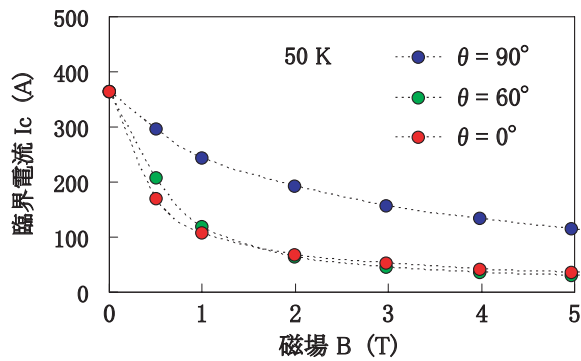


図 12 サンプル A の 50 K における臨界電流の磁場依存性 (I-B- θ -T 試験結果)

す。また I_c の判定例として、 $T=20\text{ K}$ 、 $B=0\text{ T}$ のときの発生電圧実測波形を付記した。本例のように、常電導転移を示す基準電圧を $1\ \mu\text{ V/cm}$ とすれば⁶⁾、 I_c は、線材サンプル (評価長さ 8 cm) へ通電したときの発生電圧が $8\ \mu\text{ V}$ となるときの電流値として決定される。なお、 $\theta = 60^\circ$ 、 $T=20\text{ K}$ 条件は試験未実施である。

本結果より、線材サンプルの I_c は、低温・低磁場になるほど、更に磁場角度が $\theta = 90^\circ$ のときに、大きな値をとることを確認した。特に I-B 試験結果 ($B=0\sim 0.5\text{ T}$ 、 $\theta = 0^\circ$ 、 $T=77\text{ K}$) と比較すると、同じサンプルを冷却していくと I_c が大幅に向上することがわかる。よって、本試験結果を線材の機器応用検討に活用することで、例えば大電流用途のために必要な冷却手段を確保して低温側で使用する、あるいは液体窒素に代表される簡便な冷却手法を採用することを優先し高温側にて小電流で使用するという、機器のシステム構成に関する内容に対しても定量的な検討が可能となる。

また、図 11 からは、 $\theta = 60^\circ$ の特性は $\theta = 0^\circ$ の特性とほぼ等しいことがわかる。例として、図 12 に 50 K における I_c の磁場依存性を示すが、他の温度条件においても同様に、 I_c には $\theta = 90^\circ$ 付近にピークを持つ強い磁場角度依存性があることを確認した。従って、特にコイルのような磁場環境を前提とした機器に対して線材を用いる場合、十分安定した性能を確保するために、 $\theta = 0^\circ$ における I_c の温度・磁場依存性を基本に設計検討すべきであることがわかる。

5. まとめ

- (1) RE系線材の磁気浮上式鉄道用超電導磁石への適用検討のためには、従来線材では見られなかったRE系線材特有の強い異方性を持つ通電特性を実際に確認する作業が必要であることがわかった。
- (2) 高温超電導線材の通電特性を総合的に確認するための3種類の試験装置からなる試験体系を考案した。
- (3) 77 K、低磁場領域における線材通電特性の磁場依存性を確認することのできるI-B試験装置を開発した。
- (4) 77 Kにおける線材通電特性の曲げ直径依存性を確認することのできるI- ϵ 試験装置を開発した。
- (5) 線材通電特性の磁場・磁場角度・温度依存性を確認するために、最大電流1000 A、最大磁場5.5 T、磁場角度5条件、最低温度10 Kまでのデータ取得が可能な、世界的にも数少ないI-B- θ -T試験装置を開発した。
- (6) 今後は、RE系線材の磁気浮上式鉄道用超電導磁石への適用検討のため、これら試験装置を有効に活用して、試験結果を検討にフィードバックしていく。

本研究は、国土交通省の補助金を受けて実施した。

文 献

- 1) 長嶋賢, 荒井有気, 宮崎佳樹, 小方正文, 清野寛, 笹川卓, 岩松勝: RE系線材の浮上式鉄道用高温超電導磁石への適用検討, 第76回低温工学・超電導学会講演概要集, p.84, 2007
- 2) 長嶋賢, 宮崎佳樹, 小方正文, 笹川卓, 岩松勝: RE系線材の浮上式鉄道用高温超電導磁石への適用検討 (2), 第77回低温工学・超電導学会講演概要集, p.176, 2007
- 3) 塩原融: 次世代高温超電導線材の特徴と研究開発動向, 電気学会誌, Vol.126, No.5, pp.268-271, 2006
- 4) 小方正文, 長嶋賢, 宮崎佳樹, 岩松勝, 柳瀬康人, 山下知久: 高温超電導線材評価試験装置の開発, 第78回低温工学・超電導学会講演概要集, p.102, 2008
- 5) 低温工学協会編: 超伝導・低温工学ハンドブック, オーム社, p.968, 1993
- 6) 低温工学協会編: 超伝導・低温工学ハンドブック, オーム社, p.542, 1993