

5 ミクロンの極薄ポリイミド皮膜による REBCO コイル電流密度の極大化

5 μ m-ultra-thin polyimide coating on REBCO-coated conductors to enhance coil current density

柳澤 吉紀(理研*); 佐藤 耕太, 中込 秀樹(千葉大); 長門 豊和, 上林 裕之(三菱電線工業);
松田 徹郎(横浜市大); 金 新哲, 高橋 雅人, 前田 秀明(理研)
YANAGISAWA Yoshinori (RIKEN*); SATO Kota, NAKAGOME Hideki (Chiba Univ.);
NAGATO Toyokazu, KAMIBAYASHI Hiroyuki (MITSUBISHI CABLE);
MATSUDA Tetsuro (Yokohama City Univ.); JIN Xinzhe, TAKAHASHI Masato, MAEDA Hideaki (RIKEN)
E-mail: y.yanagisawa@gsc.riken.jp

1. はじめに

REBCO 線材の最大の特徴は高磁場中における高電流密度特性と長手方向への高い引っ張り強度をあわせ持つことである。この特性を活かせば、他の線材では達し得ない高磁場かつ小型の超伝導磁石が実現できる。しかしながら、REBCO 線材では通常スパイラル巻きしたカプトンテープによる厚い絶縁被覆がなされており、コイルの導体占有率が最悪で 50%程度になってしまう。すなわちこの線材の最大の強みである高電流密度特性をコイルにおいて得られなくなってしまう。ポリマーのディップコートによる絶縁も考えられるが、アスペクト比の大きいテープ形状である REBCO 線材では、線材コーナー部で絶縁が不十分になりやすく、絶縁を 20-30 μ m 以下に薄くすることは困難である。我々はこれまで、電着技術を用いて REBCO 線材に 20 μ m 厚のポリイミド絶縁皮膜を形成する技術を開発してきた[1,2]。本報では電着プロセスを最適化することで、わずか 5 μ m 程度の厚みの皮膜を形成し、導体占有率を 90%程度に向上させて REBCO コイルの電流密度を極大化する技術を開発した。

2. 実験方法

SuperPower 社の REBCO 線材(SCS4050)にポリイミド電着皮膜をコーティングした。電着プロセスの電圧設定と、コーティング時のエアノズルの構成を調整することで 5 μ m 厚の形成を狙った。得られた皮膜線材の断面を金属顕微鏡で、皮膜表面の状態を SEM/EDS で評価した。

皮膜厚が 20 μ m の REBCO 線材、5 μ m の REBCO 線材、さらに皮膜のない裸の REBCO 線材を用いて、シングルパンケーキコイルを製作した。コイル巻線部を 3次元デジタル顕微鏡(キーエンス製)で観察した。また、線材寸法とコイル巻線の寸法からコイル内部における導体占有率を評価した。

3. 結果と考察

Fig. 1(a-1)に極薄ポリイミド皮膜 REBCO 線材の断面を示す。線材断面全体にわたり、均一で薄い皮膜が形成されている。線材の平面部では 4 μ m 程度の皮膜が、端部では若干厚いがそれでも 8 μ m 程度とほぼ均一な皮膜が形成されている (Fig. 1(a-2), (a-3), (a-3)参照)。Fig. 1(b-1), (b-2)に、SEMで撮影した皮膜表面を示す。皮膜に欠陥は見られず、滑らかな皮膜表面が形成されている。

Fig. 2に(a) 20 μ m 厚の皮膜線材で巻いたコイル、(b) 5 μ m 厚の皮膜線材で巻いたコイル、(c) 裸線材で巻いたコイルにおける巻線部の画像を示す(コイル軸方向から撮影)。20 μ m 厚の皮膜線材の場合、線材同士の間隔の皮膜部(黒色の部分)が目立ち、導体占有率は 73%である。すなわち皮膜によって約 3割も占有率が低下している。一方、5 μ m 厚の皮膜線材の場合、Fig. 2(b)に示すように線材が密に詰まっており、導体占有率は 90%である (Fig. 2(d)参照)。Fig. 2(c), (d)に示すように、裸線材の場合でも、導体占有率は 96%であることから、5 μ m 厚の皮膜線材を用いることで、到達し得る最大の導体占有率に肉薄していることがわかる。

以上のように、5 μ m レベルの極薄のポリイミド皮膜を用いることで、REBCO 線材の持つ高電流密度特性をコイルにおい

て最大限活かすことが可能になる。

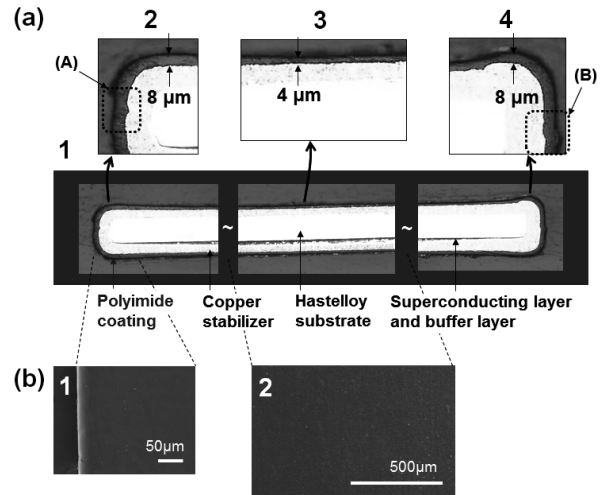


Fig. 1 (a) Cross-section of a REBCO-coated conductor with an ultra-thin polyimide coating such as 5 μ m. (b) Surface of the ultra-thin polyimide coating for the conductor edge and for the conductor center plane observed by SEM.

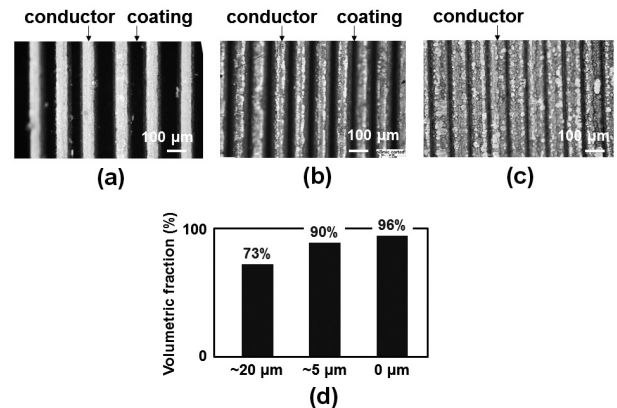


Fig.2 Micrographs of the winding area obtained from vertical direction for the coils wound with (a) a ~20 μ m-thick polyimide coated REBCO-coated conductor, with (b) a ~5 μ m-thick polyimide coated REBCO-coated conductor, and (c) a bare REBCO-coated conductor. (d) The volumetric fractions of the conductor in the coils for three test pancake coils.

4. まとめ

ポリイミド電着の皮膜形成プロセスを最適化することで、わずか 5 μ m 程度の厚みの皮膜を REBCO 線材に形成することに成功した。これにより、REBCO コイルにおける導体占有率をホルマール被覆 NbTi コイルのレベル(~90%)にまで高め、コイル電流密度を極大化することが可能である。

*理研・基礎科学特別研究員

参考文献

1. Y. Yanagisawa et. al., *Physica C* **476** 19–22 (2012).
2. K. Sato et. al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.* in Press.

ポリプロピレン絶縁 Y 系超電導線を用いたコイルの評価

Evaluation of a superconducting coil with polypropylene insulated ReBCO coated conductors.

横山 彰一、井村 武志 (三菱電機)

YOKOYAMA Shoichi, IMURA Takeshi (Mitsubishi Electric Corp.)

E-mail: Yokoyama.Shoichi@dx.MitsubishiElectric.co.jp

1. はじめに

Y 系超電導線材が市販され、そのコイル応用に期待がされるようになってきている。最近では、Y 系超電導線の特性が 500A/10mm 幅(77Ksf)を越えるものもあり、電流特性としても実用的な線材となってきた。

本報告では、市販の Y 系超電導線材に数種の絶縁処理を行い、ミニコイルを試作し、通電特性から絶縁処理による差異による影響を評価したことについて報告する。

2. 樹脂テープ絶縁 Y 系超電導線

市販されている Y 系超電導線材は主にカプトンテープで絶縁が施されている。カプトンテープは耐熱、耐電圧特性に優れているが、他のポリプロピレンやポリエステルなどの樹脂に比べ大変高価である。ここでは、低価格のポリプロピレンに目出し、Y 系超電導線の絶縁材として適用した線材を試作し巻き線、エポキシ含浸を実施した。コイル径方向応力を取って印加するために、線材に比べて熱収縮の大きいアルミ製の巻枠を用い、エポキシで巻線と共に一体化(接着)した。比較のために従来のカプトン絶縁線材のコイルも作成した。

テストコイルは、試料1はポリプロピレン2重巻、試料2はポリプロピレン+カプトンの2重巻、試料3~5にカプトン2重巻の線材を使用。試料1、2、4、5は真空含浸、試料3は塗り巻[1]にてエポキシ一体化処理を行った。

3. 内部応力印加コイル通電試験結果

Table 1に通電試験したコイルの一覧を示す。各素線の製作ロットが同一でないためエポキシ含浸前と含浸後および熱サイクル2回以上での I-V 特性の顕著な劣化の有無で比較した。その結果、試料4のカプトン絶縁+真空含浸では初回通電から劣化が発生、アルミ巻枠径をφ100とし、巻数を10ターンとし応力を大幅に低減した試料5を製作したが、Fig.1のように熱サイクルごとに劣化が進展した。一方、その他のコイルについてはいずれも劣化の発生は見られなかった。一例として試料1の結果を Fig.2 に記載する。

冷却時の最大径方向応力は、アルミと超電導素線だけで各材料の熱収縮率とヤング率から計算すると試料5のコイルが 6MPa、その他が 90MPa である。実際は、絶縁材およびエポキシの低いヤング率が影響するため特に後者は低い値になると考えられる。

4. 8パン積層コイル通電試験結果

試料1~3と同形状のパンケーキコイルを8個積層したコイルを作成した。各パンケーキごとに電圧タップを設け、液体窒素中で通電した結果、65A 付近から端部コイルに電圧が発生した。

液体 He を用い、7T バイアス磁界中で225Aまでノーマル発生なく通電ができた。この時の最大経験磁界は 9.3T で、このときの負荷率は約 80%程度である(Fig.3)。再度液体窒素中で通電した結果、上記とほぼ同じ特性となり劣化は認められなかった。

5. まとめ

低価格のポリプロピレンフィルム絶縁による Y 系超電導線を用いたコイルを試作した結果、顕著な劣化は無く通電ができ、8パン積層コイルは自己磁界 2.3T(バイアス 7T、4K、負荷率 80%)を発生することができた。

参考文献

[1]横山彰一: 第 85 回低温工学・超電導学会予稿集(2011)18

Table 1 Specifications of stress test coils

	内径(mm)	外径(mm)	巻数	絶縁材/含浸方式	判定
試料1	90	130	78	PP/真空	○
試料2	90	130	81	PP+PI/真空	○
試料3	90	130	87	PI/塗り巻	○
試料4	90	130	68	PI/真空	×
試料5	100	105	10	PI/真空	×

*PP:ポリプロピレン、PI:ポリイミド(カプトン)

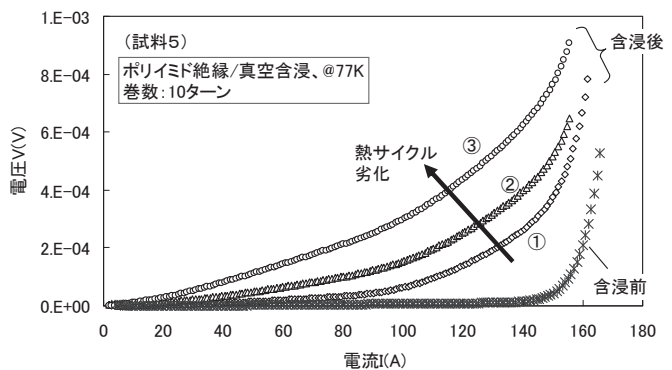


Fig.1 I-V characteristics of the No.5 test coil

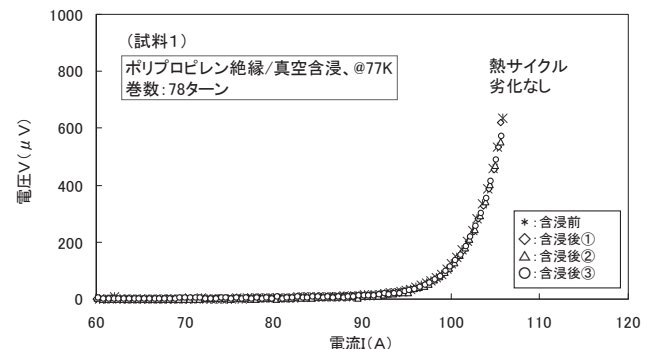


Fig.2 I-V characteristics of the No.1 test coil

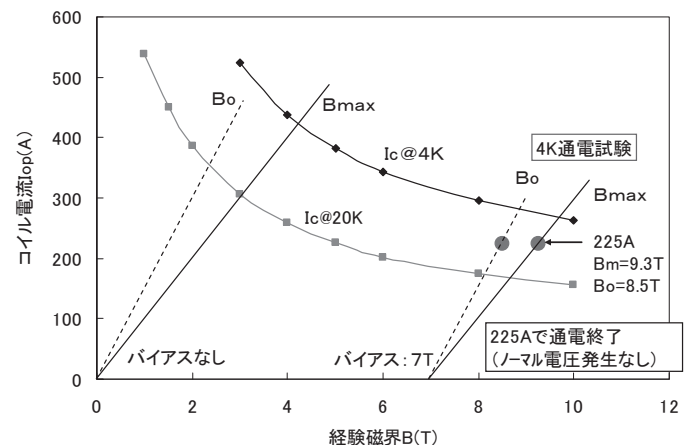


Fig.3 The load line of a stacked coil

REBCO コイルが切り拓く超伝導コイルシステムの新時代へ向けて —世界初の LTS/REBCO NMR システムにおける多次元 NMR—

Towards a new era of superconducting coil systems with REBCO coils - World's first 2D-NMR spectra for a LTS/REBCO NMR system -

柳澤 吉紀(理研*); 朴 任中, 中込 秀樹(千葉大); 小湊 健太郎, 濱田 衛(JASTEC); 松本 真治, 木吉 司(NIMS);
末松 浩人(JEOL RESONANCE); 金 新哲, 高橋 雅人, 前田 秀明(理研)

YANAGISAWA Yoshinori (RIKEN*), PIAO Renzhong, NAKAGOME Hideki (Chiba Univ.); KOMINATO Kentaro,
HAMADA Mamoru (JASTEC); MATSUMOTO Shinji, KIYOSHI Tsukasa (NIMS); SUEMATSU Hiroto (JEOL RESONANCE);
JIN Xinzhe, TAKAHASHI Masato, MAEDA Hideaki (RIKEN)
E-mail: y.yanagisawa@gsc.riken.jp

1. Introduction

REBCO-coated conductors are promising to open a new era of various superconducting coil systems, such as high-field magnets for NMR, MRI, accelerators and power apparatus. For NMR magnets, magnetic field can be substantially enhanced if we use REBCO coils; i.e. 1.8 GHz (42.3 T) class NMR magnet is probable, which is the same size as to that of 1.03 MHz (24.2 T) NMR magnet, by operating the coils with high hoop stress and high current density.

As the first step towards the next generation ultra-high field NMR, we have developed a LTS/REBCO NMR system operated at 400 MHz (9.4 T) by integrating the technology developed in our previous works[1,2]. This paper presents results for the world's first NMR system using a REBCO coil, which is also the world's first full-scale REBCO coil system.

2. Experimental

An REBCO insert coil was impregnated with paraffin wax to prevent degradation[2]. A Bi2223 insert coil developed in the earlier work[3] for a 500 MHz LTS/HTS NMR magnet was replaced by the REBCO insert. The magnet was operated at driven mode with a highly stabilized DC power supply. A set of ferromagnetic shim rings and plates were installed in the RT bore, which was optimized to correct error harmonics caused by the screening current. The magnetic field fluctuation caused by a DC power supply in driven mode was stabilized by a ^2H internal lock[3]. After any magnetic field inhomogeneity was corrected with cryo-shims and RT-shims, both the ^1H spectrum shape for the standard sample of 1% CHCl_3 in acetone- d_6 and long-term field stability over 5 hr were measured. Finally, a 2D-COSY NMR measurement for amino acid was made.

3. Results and discussions

A remarkable magnetic field drift with time, due to relaxation of the screening current, was observed after charging the magnet; the magnitude of the drift is 20-times larger than that for the LTS/Bi2223 NMR obtained in 2008[3]. A current sweep reversal[4] as large as 5% of the peak current was applied, which suppressed the magnetic field drift.

Enormous field error-harmonics of z^2 emerged, as seen by the open circle data in Fig. 1, as the z^2 -harmonics generated by correction coils outside the main coil were shielded by the screening current in the REBCO insert. The remnant z^2 -harmonics was corrected using ferromagnetic shim rings installed in the RT bore. The z^2 error harmonics over 2 cm was reduced from -66 ppm to -0.15 ppm as shown by Fig. 1.

Figure 2 shows a long term field stability and field homogeneity. Both the peak frequency and the spectrum shape remain constant over 5 hr, which represents that the stable and homogeneous magnetic field was achieved to make NMR measurements. Figure 3 shows 2D-COSY NMR spectrum for an amino acid sample of lysine, representing the spin coupling between nuclei.

4. Conclusions

We developed a LTS/REBCO NMR system operated at 400 MHz (9.4 T) and achieved world's first 2D NMR measurement using a REBCO coil, which is also the world's first successful

REBCO coil system.

This work is supported by Strategic Promotion of Innovative Research and Development Program, JST, Japan.

*Special Postdoctoral Researchers Program, RIKEN

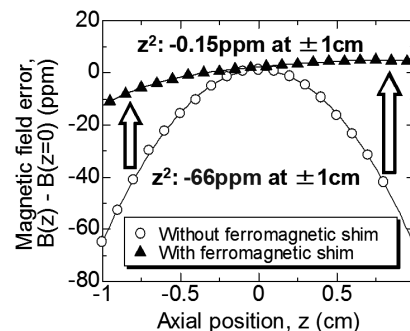


Fig.1 Magnetic field distribution along coil axis for the LTS/REBCO NMR magnet operated at 400 MHz (9.4 T).

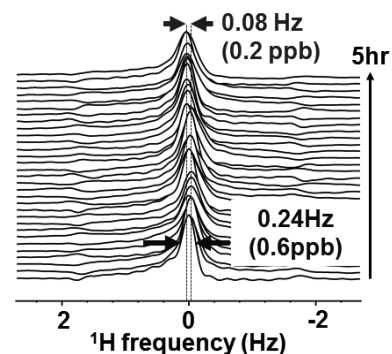


Fig.2 Long term field stability and field homogeneity for the LTS/REBCO NMR magnet operated at 400 MHz (9.4 T).

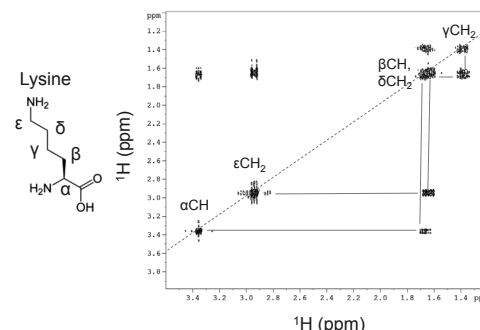


Fig.3 2D-COSY spectrum obtained for an amino acid sample of lysine for the LTS/REBCO NMR magnet operated at 400 MHz (9.4 T).

References

1. Matsumoto et al, *SuST* **25**, 025017 (2012)
2. Takematsu et al, *Physica C* **470**, 674 (2010)
3. Yanagisawa et al, *J. Mag. Res.* **203**, 274 (2010)
4. Yanagisawa et al, *Physica C* **469**, 1996 (2009)

輻射シールドレス Y 系伝導冷却マグネットの通電特性

Operating test of a radiation shield-less conduction-cooled YBCO magnet

宮崎 寛史, 岩井 貞憲, 高橋 政彦, 戸坂 泰造, 田崎 賢司, 石井 祐介 (東芝)

MIYAZAKI Hiroshi, IWAI Sadanori, TAKAHASHI Masahiko, TOSAKA Taizo, TASAKI Kenji, ISHII Yusuke (TOSHIBA)

E-mail: hiroshi17.miyazaki@toshiba.co.jp

1. はじめに

超電導コイルを冷凍機で伝導冷却するマグネットでは、2 段冷凍機の 1 段ステージで冷却された輻射シールドにより超電導コイル部への熱侵入量を低減する方法が一般的である。Y 系線材は 20 K 以上でも高い臨界電流密度を有しているため、輻射シールドがない簡素なマグネット構成が可能となる。しかしながら、輻射シールドレスマグネットでは、超電導コイル部への熱侵入量が増加してしまうため、コイル内部に温度差が生じてしまう。また、冷凍機が停止した場合に、コイル温度がすぐに上昇し、クエンチしてしまう問題も生じる。そこで、冷凍機とコイル間の熱抵抗を大きくすることでコイル部への熱侵入量を低減したマグネットを開発した[1]。本発表では、輻射シールドレスマグネットを用いて、通電中に冷凍機を停止する試験を実施し、新しいマグネット構成の有効性を検証したので報告する。

2. マグネットの特長

輻射シールドレスマグネットの概略構成を Fig.1 に示す。超電導コイルはコイルケースで覆われており、超電導コイルとコイルケースの間に熱伝導率が小さい材質で構成された固体断熱層を設けている。超電導コイルとコイルケース間の熱抵抗が大きくなるため、冷凍機が停止した場合には、コイルケースとコイル間に温度差を生じさせることでコイルの温度上昇速度を緩やかにすることができる。

これらの効果を実証するために試作した輻射シールドレスモデルマグネットに使用した Y 系コイルを Fig.2 に示す。内径 600 mm, 外径 730 mm のシングルパンケーキコイル(#A および #B) を 2 枚積層したコイルであり、Y 系線材 1 本と線材使用量を減らすために使用した SUS 線 3 本で構成されている。2 積層コイルの健全性を評価するために、#A および #B コイルの両端に電圧タップを取り付け、液体窒素中で通電試験を実施した。試験結果を Fig.3 に示す。#A および #B コイルの I_c は、56 A, 63 A であり、n 値 ($10^{-9} \sim 10^{-7}$ V/cm 定義) は、どちらも 23 と低電界領域まで良好な超電導特性を有することを確認した。

3. 冷凍機停止試験

輻射シールドレスモデルマグネットを冷却した結果、およそ 14 時間で運転限界温度(42 K)以下になることを確認した。コイル温度が定常になったことを確認後、定格の 250 A 通電し、通電中に冷凍機を停止する試験を実施した。試験結果を Fig.4 に示す。コイルとコイルケースに温度差が生じることで、コイル温度が緩やかに上昇し、37 分間通電できることを確認した。以上の結果より、新たに提案したマグネット構成が、冷凍機停止後の運転保持に有効であることを確認した。

4. まとめ

冷凍機停止後も一定時間運転可能な輻射シールドレスマグネットの開発を進めている。今回、モデルマグネットを試作し、定格 250 A 通電中に冷凍機を停止する試験を実施した。冷凍機停止後、コイル温度は緩やかに上昇し、37 分間運転できることを実証し、新しいマグネット構成の有効性を確認することができた。

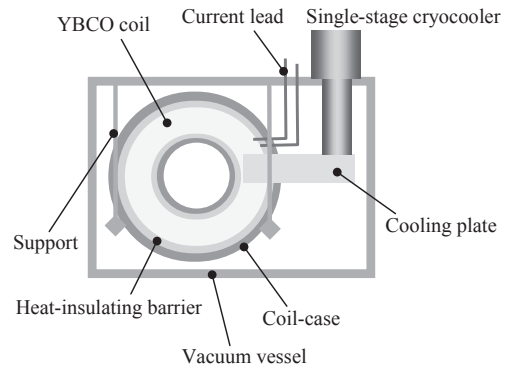


Fig.1 Schematic drawing of radiation shield-less magnet

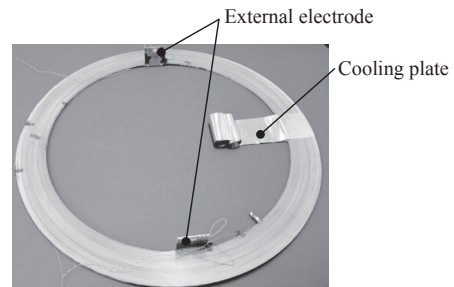


Fig.2 Photograph of 2 stacked pancake coils

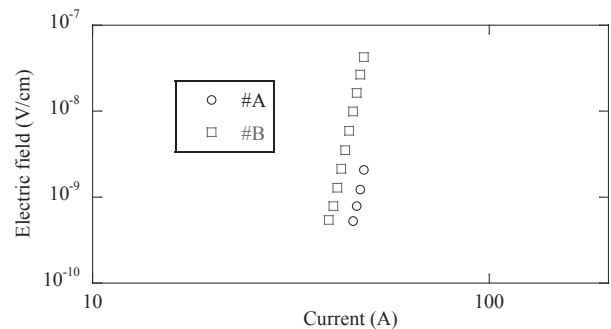


Fig.3 E-I characteristics of 2 stacked pancake coils at 77 K

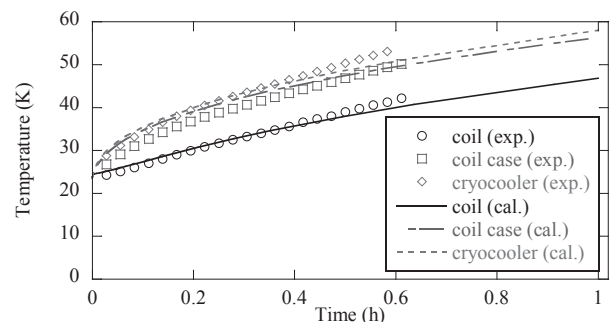


Fig.4 Time variations of magnet temperatures after stopping the cryocooler in model magnet

参考文献

- H. Miyazaki, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 86 (2012) p.126-127

伝導冷却型イットリウム系コイルの磁場中通電特性

Operating test results of a conduction-cooled coil wound with YBCO wide tapes in background magnetic field.

岩井 貞憲, 宮崎 寛史, 戸坂 泰造, 田崎 賢司, 石井 祐介 (東芝)

IWAI Sadanori, MIYAZAKI Hiroshi, TOSAKA Taizo, TASAKI Kenji, ISHII Yusuke (TOSHIBA)

E-mail: sadanori.i@toshiba.co.jp

1. はじめに

伝導冷却型イットリウム系(以下Y系)コイルの実機適用に向け、高磁場化を目指した開発を進めている。SMES や NMR、強磁場マグネットのように複数の超電導コイルから構成される機器では、外部磁場による電磁力に耐え得る機械強度と適切な伝熱パスが必要となる。しかしながら、実際に伝導冷却下でY系コイルの磁場中通電特性を評価した報告は少ない。そこで、Y系コイルを外部磁場中においても熱暴走させることなく、安定に通電することができるか検証する目的で、以前報告した単独で5.9 Tの中心磁場を発生可能な4積層コイル[1]について、伝導冷却下10 K、バックアップ磁場5 T中での通電試験を実施したので報告する。

2. コイル諸元

4積層コイルの諸元を Table 1 に示す。本コイルは12 mm幅のYBCO線材を用いたシングルパンケーキコイル(#1, #2, #3, #4)を積層した構成となっている。伝導冷却時の伝熱パスとして、コイルはエポキシ樹脂で含浸し、また各パンケーキコイルの層間には、アルミ冷却板(t 0.25 mm)を挿入した。前述のように本コイルは、単独での伝導冷却試験を実施済みであり、伝導冷却下でも特性劣化がないこと、また20 Kで903 A(380 A/mm²)通電時、コイル中心磁場5.9 Tの発生を確認している[1]。

3. 磁場中通電試験

コイルから引き出したアルミ冷却板をGM冷凍機の2段階ステージに熱的に接続し、4積層コイルを Fig. 1 に示す伝導冷却試験装置に組み込んだ。温度制御は、2段階ステージに取り付けたヒーターで行い、コイル温度を一定に維持した。なお、発生電圧は各シングルパンケーキコイルの両端に取り付けた電圧タップで測定し、磁場測定のためコイル中心にホール素子を取り付けた。本伝導冷却試験装置を、同図に示すように5 T-NbTi マグネットの磁場中心に機械的に固定し、これにより伝導冷却下10 K、バックアップ磁場5 T中での通電試験を実施した。

通電結果を Fig. 2 に示す。今回は、コイル自身が発生する中心磁場がバックアップ磁場と同等となるコイル中心磁場10 Tの発生を目指して通電した。796 A通電時、コイル中心磁場は10.1 Tに達したが、コイル電圧が急上昇するなどの異常は見られず、熱暴走することなく安定に通電することができた。なお、796 A通電時の最大経験磁場は10.8 Tとなり、BJRから計算される最大フープ応力は179 MPaであった。

4. まとめ

伝導冷却Y系コイルを外部磁場中에서도熱暴走させることなく、安定に通電することができるか検証するため、実際に伝導冷却下10 K、バックアップ磁場5 T中で通電試験を実施した。コイル中心磁場が10.1 Tに達しても、コイル電圧が急上昇するなどの異常は見られず、外部磁場中에서도安定に通電可能であることを示した。今後は、より高い温度での通電特性についても調べていく。

Table 1 Specification of a coil composed of a stack of 4 single pancakes wound with 12 mm-wide YBCO tapes

Tape width (mm)	12
Tape thickness (mm)	0.1
Tape length / pancake (m)	24
Tape min. Ic(77K, s.f.) (A)	258~304
Inner diameter (mm)	50
Outer diameter (mm)	90~91
Height (mm)	53
Number of pancakes	4
Number of total turns	446

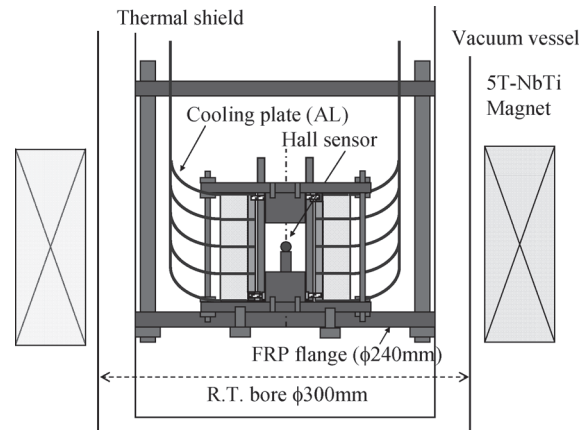


Fig.1 Schematic drawing of experimental set-up

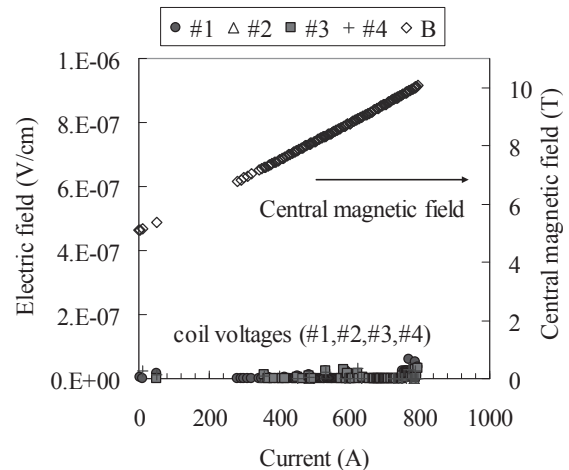


Fig.2 Operating test results of conduction-cooled coil at 10 K in 5 T background magnetic field

参考文献

- S. Iwai, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 86 (2012) p.129

イットリウム系超電導線材を用いた鞍型コイルの開発

Development of saddle-shaped coils wound with YBCO tapes

高山 茂貴, 小柳 圭, 戸坂 泰造, 田崎 賢司, 来栖 努, 石井 祐介(東芝)

TAKAYAMA Shigeki, KOYANAGI Kei, TOSAKA Taizo, TASAKI Kenji, KURUSU Tsutomu, ISHII Yusuke (Toshiba)

E-mail: shigeki2.takayama@toshiba.co.jp

1. はじめに

イットリウム系(Y系)超電導コイルの実機適用に向け、巻線技術の開発を進めている。加速器用ビーム輸送マグネットや回転機などでは鞍型形状のコイルが用いられ、特に高い磁場強度が求められる場合には超電導が適用される。一方で、前述のコイルにY系線材を適用した場合、単純なフラットワイズ方向だけではない変形を加えながら巻線を行う必要がある。しかし、Y系線材はテープ形状であるため、幅方向に曲げることが困難であって、無理に曲げた場合、超電導体に大きな歪みが生じ超電導特性が劣化してしまう[1]。そのため、鞍型コイルを巻線する場合はコイル形状および巻線時の形状維持が課題となる。そこで今回、歪みの少ないコイル形状を計算によって求めると共に、計算結果をもとにコイル試作を行ったのでその結果に関して報告する。

2. コイル設計

使用した線材の諸元を Table 1 に、試作した鞍型コイルの諸元を Table 2 に示す。今回試作したコイルではビーム輸送用マグネットの一部を想定し、外半径 70mm のボア表面に鞍型コイルの巻線を行った。コイル開口角は±70 度程度であり、直線部長さは 200mm、屈曲部長さは片側 100mm とした。コイル最内周において、線材を傾けることで、線材幅方向上端と下端の長さを等しくしており(等周条件)、その結果、線材にエッジワイズ歪みが発生しない形状としている。各位置での傾斜は計算によって求め、直線部においては線材幅方向が内側ボアの半径方向を向いており、屈曲部では線材が立ち上がるのと同時に連続的に傾斜が大きくなり、屈曲部頂点で約 45 度傾いた形状となっている。

Table 1 Specifications of YBCO tape

Width	4 mm
Thickness	0.1 mm
Copper stabilizer thickness	0.04 mm
Substrate	Hastelloy®
Type	Zr-doped wire
YBCO tape I_c (77K, self field)	103 A (End to End)

Table 2 Specifications of YBCO coil

Type of coil winding	Saddle-shape coil
Coil length	400 mm
Outer radius of bore	70 mm
Open Angle	±70 deg.
Number of turns	25
Tape length	25 m

3. コイル試作・特性評価試験

コイル設計をもとに、線材長 25m で 25 ターンのコイルを巻線した。試作したコイルの外観を Fig.1 に示す。巻枠は FRP 製で、等周条件を満たした形状に多軸NCにて削り出すことで製作した。直線部に設けた電極に線材の端部を固定し、一ターン目は巻枠に線材を接着しながら、二ターン目以降は前のターンに接着しながら巻線することでコイルを保持しながら巻線し、設計したコイル形状を実現した。

試作したコイルの両端に電圧タップを設け、液体窒素にて冷却し、通電試験を実施することでコイルの発生電圧挙動を観察した。測定したコイルの V-I 特性を Fig.2 に示す。10⁸V/cm の低電界領域まで n 値が 28 と高い特性を示したことから、鞍型形状に巻いたコイルが良好な超電導特性を有していることを確認した。

4. まとめ

ビーム輸送マグネットを想定した鞍型形状のコイルを試作し、超電導特性に劣化の無いことを確認した。引き続き、磁場分布の詳細な測定を進めている。

参考文献

1. D C van Laan, et al.: Supercond. Sci. Technol., Vol. 21 (2008) 115002

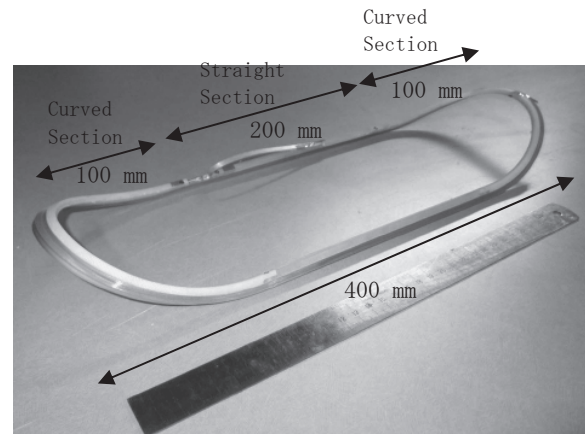


Fig.1 Outer view of YBCO coil

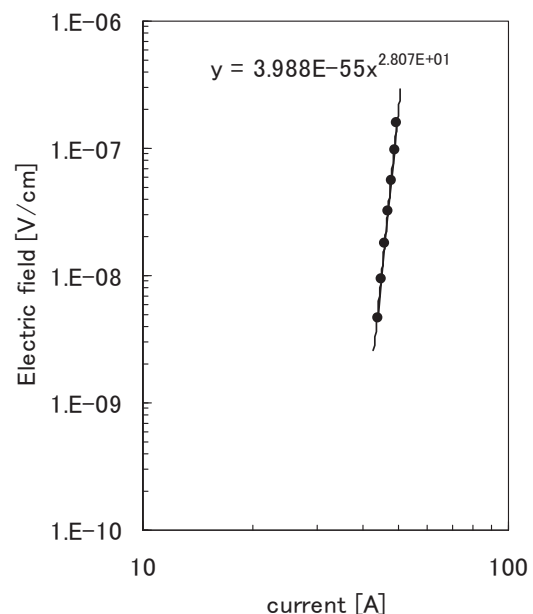


Fig.2 V-I characteristics of YBCO coil

GdBCO 線材の機械的接合における抵抗の温度・磁場依存性基礎評価

Fundamental evaluation of dependence of electrical resistance near joint region on temperature and magnetic field in mechanical joint of a GdBCO tape

清野 祐太郎, 伊藤 悟, 橋爪 秀利(東北大学)

SEINO Yutaro, ITO Satoshi, HASHIZUME Hidetoshi (Tohoku Univ)

E-mail: ysei@karma.qse.tohoku.ac.jp

1. はじめに

本研究グループでは核融合炉の製造コスト、メンテナンスコストを削減し得る新しい設計案として、マグネットを分割製造し、機械的に接合することで着脱可能とする分割型高温超伝導マグネットを提案しており[1]、これまで、2 kA 級の銅ジャケット付 REBCO 導体の機械的接合における接合抵抗を評価してきた。しかしながら、従来の評価試験は外部磁場を印加していない状態で行われてきたものであり、実際の核融合炉環境のような強磁場下における接合抵抗について詳細な評価は行われていない。Holm の接触理論[2]によると接触抵抗は接触材料の電気抵抗率に比例するが、金属の電気抵抗率は温度・磁場に依存する。そのため大型導体の接合構造を検討し、接合試験結果から接合構造を改善するためには、導体構造・接合部構造依存性、温度・磁場依存性を、要素試験および数値解析により予測する手法を確立する必要がある。そこで本研究では機械的ラップジョイント体系において、接合抵抗の温度・磁場依存性を実験的に評価した。また電流分布解析により接触抵抗を抽出し、Holm の接触理論と比較した。

2. 接合試験

GdBCO テープ(フジクラ・FYSC-SC05・ $I_c=260$ A)の銅層同士を直接接触させる直接接合(Dry Joint)とテープ間に In 箔を挿入する In 箔挿入接合(In Joint)の2種類の接合方法において接合抵抗を評価した。Fig.1 に直接接合の試験部の概要を示す。皮膜抵抗の影響を軽減するために接合面を $5 \mu\text{m}$ のアルミナ粒子で研磨、アセトンとエタノールで洗浄し、ボルト締めにより 100 MPa の接合応力を加えた。試験部は GM 冷凍機付のクライオスタットに設置し、ヒータにより温度調整を行い、GdBCO テープの c 軸方向に磁場を印加した。実験条件は温度 $10 \text{ K} \sim 70 \text{ K}$ (Fig. 1 に示す位置に取り付けたセルノックス温度計により測定)、外部磁場 $0 \text{ T} \sim 15 \text{ T}$ である。

0 T , 100 A における接合抵抗の温度依存性を Fig. 2 に示す。直接接合の接触材料は銅、In 箔挿入接合の接触材料は銅とインジウムである。Fig. 2 より、接触材料の違いによって接合抵抗の温度依存性の特性が異なることが確認できた。また、磁場依存性についても同様に接触材料の違いによる接合抵抗の磁場依存性の違いを確認した。

3. 2次元電流分布解析

次に数値計算による2次元電流分布解析を用いて、接合試験結果から接触抵抗を抽出し、接触抵抗の温度依存性を定量的に評価した。Fig.3 に In 箔挿入接合の場合の解析モデルを示す。接触抵抗は仮想導体を設置することで模擬している。本解析には COMSOL Multiphysics 4.2a を使用した。銅層、In 箔の電気抵抗率は実験で測定したものを、銀層については文献値を用いた。ハンダ接合部の抵抗については過去の研究で同構造の GdBCO テープのハンダ接合の接合抵抗を評価した例[3]があり、その実験結果と数値解析を用いて算出した。また、 70 K における接触抵抗率と各接触材料の電気抵抗率から Holm の接触理論を用いて、接触抵抗に皮膜抵抗が含まれていないと仮定した場合の各温度における接触抵抗率を計算した。得られた結果を Fig. 4 に示す。抽出した接触抵抗率は温度とともに減少しているが、皮膜抵抗を無視した場合の接触抵抗率の計算値とは一致しておらず、こ

の差は皮膜抵抗の影響である可能性がある。今後、皮膜抵抗の原因となる物質の特定とその電気抵抗率を調査し、より詳細な評価を行う予定である。また、接触抵抗の磁場依存性についても必要なデータを順次取得し、結果の分析を進める。

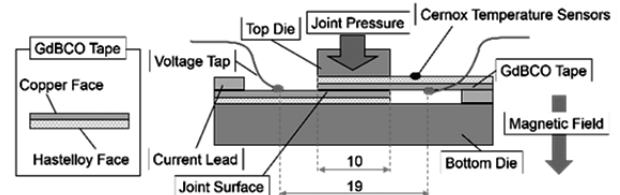


Fig. 1 Test section.

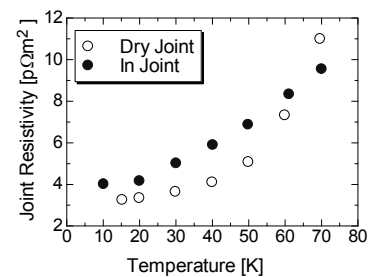


Fig. 2 Joint resistivity depending on temperature.

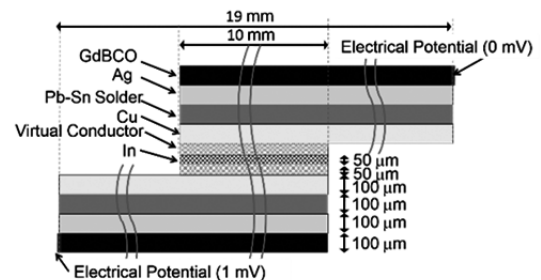


Fig. 3 Numerical models.

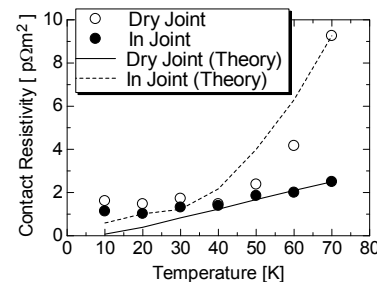


Fig. 4 Contact resistivity depending on temperature.

謝辞

本研究は、東北大学金属材料研究所附属強磁場超伝導材料研究センター(課題番号 12H0204)で行われた。ここに記し謝意を示す。

参考文献

- H. Hashizume, et al.: Journal of Plasma Fusion Research SERIES, vol. 5, (2002), pp. 532-536.
- R. Holm, "Electrical contacts – Theory and Application", Springer Verlag, Berlin, (1967).
- Y. Terazaki, et al.: 第9回核融合エネルギー連合講演会予稿集, (2012), 28A-76P.

トーラスプラズマ実験装置 Mini-RT 用の ReBCO 線材コイル製作の概要

Fabrication of ReBCO Coil for the Plasma Experimental Device Mini-RT

小川 雄一, 森川 惇二, 内島 健一朗, 保坂 友一朗, 河合 智賀(東大); 三戸 利行, 柳 長門, 夏目 恭平(核融合研), 寺崎 義朗(総研大); 能瀬 眞一, 富岡 章(富士電機); 岩熊 成卓(九大)

OGAWA Yuichi, MORIKAWA Junji, UCHIJIMA Kenichiro, HOSAKA Yuichiro, KAWAI Chika(Univ. of Tokyo); MITO Toshiyuki, YANAGI Nagato, NATSUME Kyohei(NIFS), TERAZAKI Yoshiro(Sokendai); NOSE Shin-ichi, TOMIOKA Akira(Fuji Co.);

IWAKUMA Masataka(Kyushu Univ.)

E-mail: ogawa@ppl.k.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

トーラスプラズマ実験装置 Mini-RT では、Bi-2223 高温超電導線材を用いた内部導体コイルを製作しプラズマ実験に供してきた。ここでは高温超電導コイルを真空容器内で冷却・励磁すると共に、永久電流スイッチ PCS をコイル内に内蔵させ、永久電流モードでの運転を行っている。約10年間の運転による超伝導コイルの特性劣化が顕在化してきたことと共に、コイル特性の性能向上を図るべく、ReBCO 線材コイルの設計・製作を行った。

2. Mini-RT 装置用 ReBCO 線材コイル

内部導体コイルの断面を Fig. 1 に示す。主コイルと共にバイファイラー巻きされたコイル状の PCS が輻射シールドで覆われており、これを20K のヘリウムで冷却する。この主コイルおよび PCS を ReBCO 線材に置き換えるべく設計した。主コイルの巻き寸法はビスマスコイルと同サイズであるため、ReBCO 線材もビスマス線材と同じ幅である必要があり、4.3mm幅の線材を用いた。約0.1

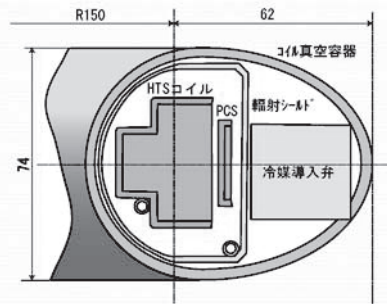


Fig. 1 Cross Section of Mini-RT Coil

mm厚のReBCO線材に0.1mmの銅を貼り付け、それをカプトンテープで巻き絶縁を施した。これをエポキシ含浸しながらコイル化した。その結果、552ターンのコイル巻き数が確保でき、従来のビスマスコイルより約1.3倍の巻き数増加が図れた。なお約300m長さの線材を用いたので、途中でReBCO線材の接続が必要となった。線材接続は、安定化用の銅側をハンダ付けして行った。因みにハンダ付け長さは30mmとした。

永久電流モードでの運転では、電源から切り離されるので、クエンチ時にはコイル内で磁気エネルギーを消費しなければならない。常伝導化した線材長さが10m程度になれば温度上昇も低く抑えられるので、上下のコイル巻棒内側にアルミ箔を挿入し、コイル層間での熱伝導を出来るだけ良くする対策を施した。表1にビスマスコイルとReBCOコイルとの主要パラメータを示す。コイル巻き数が増えたので、定格電流を100A程度まで下げても、コイル起磁力はビスマスコイルよりも増やす事ができた。一方、PCSは従来のビスマス線材PCSと比較して、以下のような改善を図った。

- クエンチ時のエネルギーを吸収するのに必要な最小限のサイズにまで小型化した。
- 0.1mmのSUSテープをReBCOコイルと共に巻きすることにより、コイル全体にわたり均一に加熱できるようにした。
- 冷却パイプをPCSコイル棒の上下に設置し、速い時定数での冷却を可能にした

Table 1 Specification of Mini-RT Coils (BSCCO and ReBCO)

	Mini-RT/Bi	Mini-RT/RE
主半径	150mm	149.3mm
小半径	16.2mm	16.0mm
臨界温度	113K	92K
コイル巻き数	428	552
線材長さ	403.4m	517m
定格電流	117A	100A
定格励磁電流	50kA	55.2kA
インダクタンスL	0.0876H	0.144H
蓄積エネルギー	598J	720J

主コイルとPCSとを組み合わせたコイル励磁回路を図2に示す。なおV6とV16が外部電源に接続されている。また電源との接続には、電源側からの熱侵入によるクエンチを考慮して、現有コイルと同様にBi-2223線材を用いた。なお図中の赤丸は超伝導線材の接続部である。

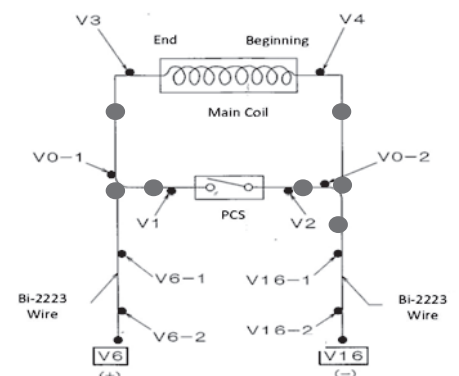


Fig. 2 Circuit of ReBCO coil and PCS (The cable joints are shown by red circles.)

ReBCO線材を捻じれないという点を考慮した上で、銅層面同士をハンダ付けする必要があった。主コイル内およびPCS内にも接続部がある事を考えると、永久電流回路では、総勢7か所の接続部となる。

3. 永久電流モードでの実験結果

永久電流モードでの運転では、まず20Kに冷やされたPCSを4分程度の時間に95K程度まで昇温させ、スイッチオフ状態とする。そこで図2に回路に示されているように、外部電源により主コイルを定格電流まで1A/sの速度で励磁する。その後、PCSを6分程度で急速に冷却しスイッチオン状態に戻す。その後、外部電源電流をゼロまで下げ、主コイルとPCSとで永久電流モードにする。

コイル温度を25Kから45K領域で変化させ、またコイル電流も30Aから100A程度まで変えて、永久電流モードでの電流減衰を調べた。その結果、減衰時定数が200-300時間というデータが得られた。これは数時間のプラズマ実験を行う上では、十分優れた特性であると言える。またこの時定数は、通電電流にはあまり依存せず、コイル温度に大きく依存することが確認できた。しかも時定数から算出される抵抗は、7か所の接続部の抵抗値でほぼ説明できる値であることも分かった。

トラスプラズマ実験装置 Mini-RT 用の ReBCO 線材コイルの冷却・励磁試験 Cool-down and excitation tests of the ReBCO coil for the torus plasma experimental device Mini-RT

夏目 恭平, 三戸 利行, 柳 長門(核融合研); 寺崎 義朗(総研大),
小川 雄一, 森川 惇二, 内島 健一郎, 保坂 友一郎(東大); 能瀬 眞一(富士電機)
NATSUME Kyohei, MITO Toshiyuki, YANAGI Nagato (NIFS); TERAZAKI Yoshiro (Sokendai);
OGAWA Yuichi, MORIKAWA Junji, UCHIJIMA Ken-ichiro, HOSAKA Yuichiro (Univ. of Tokyo); NOSE Shin-ichi (Fuji Co.)
E-mail: natsume@nifs.ac.jp

1. Summary for JST

A magnetically-levitated superconducting coil using ReBCO tape conductors has been developed for upgrading the Mini-RT device at the Univ. of Tokyo. The performance of the new coil was examined at NIFS using a GM cryocooler prior to the installation of the coil in the Mini-RT vacuum vessel. The coil was cooled by circulating helium gas in pipes attached on the coil frame. The coil current has achieved the rated value of 100 A at temperature 36-41 K and the persistent current mode was successfully obtained.

2. Introduction

The floating coil of the Mini-RT device was the first application of HTS for fusion research, followed by the larger device RT-1. Both coils were wound with BSCCO tapes. For further advances of the RT project, the upgrading plan of Mini-RT was initiated to replace the floating coil by a new one wound with the latest REBCO tapes. In this presentation, the performance test results of the manufactured REBCO coil are reported.

3. Design of Mini-RT/RE coil

The new HTS floating coil wound with REBCO tapes has the same diameter of 300 mm with that of the former BSCCO coil. The nominal operation condition requires the tape current of 100 A, which corresponds to 55 kA for the total coil current having 552 turns of windings. A persistent current switch (PCS) for the direct charging method is also made by the same REBCO tape. The floating coil is indirectly cooled to 20 K by forced flow of cold helium gas with a cooling pipe attached to the surface of the winding bobbin [1].

4. Experimental set-up

A schematic view of the experimental set-up for the performance test of the Mini-RT/RE coil at NIFS is shown in Fig. 1. The coil was placed in a cryostat with a thermal shield. Helium gas in the cooling pipes was circulated by a compressor and cooled by the GM cryocooler. The excitation test was carried out by gradually increasing the current up to 100 A. The coil current was evaluated by measuring the magnetic field at the coil center using a Hall probe. Voltage taps were attached on the tapes in various positions to measure the coil voltage and the joint resistances at the leads.

5. Results

Fig. 2 shows the waveforms of the coil current, the temperatures and the PCS heater power. The coil has been successfully excited up to 100 A with a proper PCS operation. The central field given by the Hall probe was 0.21 T, which was the same with that expected by a numerical calculation. The time constant of the current decay during the persistent current mode operation was evaluated at the coil temperature of 36 K and 41 K to be 306 and 228 hours, respectively. These values are consistent with the estimation based on the measured joint resistances [2] and they are much longer than that of the previous floating coil of Mini-RT made of BSCCO tape (41 hours before the aged deterioration[3]). By the test

results, it has been confirmed that the promising performance of the manufactured REBCO floating coil should be achieved to further promote the Mini-RT project.

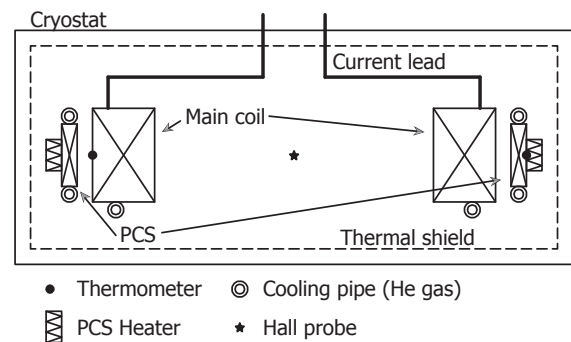


Fig. 1 Schematic view of experimental set-up

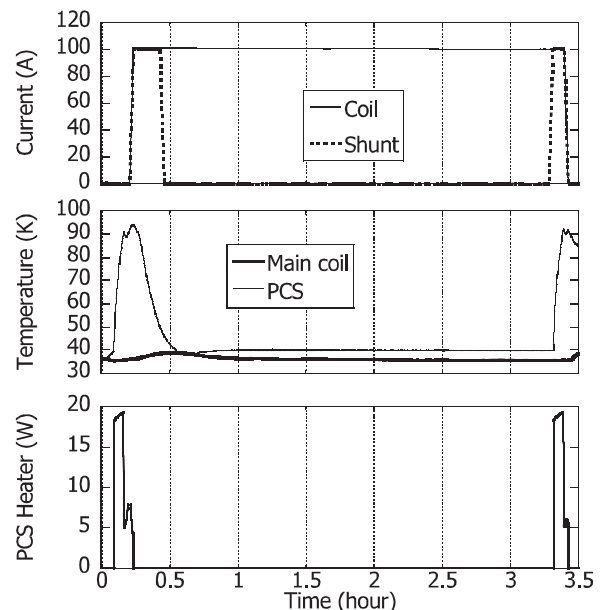


Fig. 2 Waveforms of the current of the power supply, the coil current (evaluated by a Hall probe), the temperature of the main coil and PCS, and the PCS heater power.

References

1. Y. Ogawa, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 87 (2013) 1A-p02
2. Y. Terazaki, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 87 (2013) 2P-p27
3. N. Yanagi, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. 13 (2003) 1504-1507

Bi-2223 コイルの強磁場中通電特性評価

Transport characteristics of Bi-2223 coil in high magnetic fields

西島 元, 北口 仁 (NIMS); 三好 康之, CHAUD Xavier, DEBRAY François (LNCMI); TIXADOR Pascal (CNRS)
 NISHIJIMA Gen, KITAGUCHI Hitoshi (NIMS);
 MIYOSHI Yasuyuki, CHAUD Xavier, DEBRAY François (LNCMI); TIXADOR Pascal (CNRS)
 E-mail: nishijima.gen@nims.go.jp

1. はじめに

高温超伝導線材の応用においては、顕著に高い臨界温度と上部臨界磁場の活用がキーとなる。つまり低温・強磁場か高温・低磁場で応用することで低温超伝導では実現しえないことを実現できる。最近では RE-123 コート線材の性能が向上し、応用研究も盛んになっているが、Bi系と RE 系とでは、どちらも最終形状がテープではあるものの、長尺化の観点からは伸線加工技術の適用が可能な Bi 系のほうが一日の長がある。

NIMS は Bi-2223 の応用開発研究に取り組む中でソレノイドコイルの磁場中通電試験を行い、Bi-2223 の低温強磁場特性を調べるとともに、測定技術開発も行って来た [1,2]。本研究では、銅合金補強 Bi-2223 線材を用いたソレノイドコイルの 4.2 K、強磁場 ($B < 17$ T) における通電試験を行い、その特性を調べた。

2. コイル諸元

供試コイルは 2.8 mm 幅×0.32 mm 厚 (0.2 mm 厚銅合金補強を含む) の DI-BSCCO[®]線材 (Type-ACT) を用いて製作されており、内径 65 mm、外径 83 mm、高さ 60 mm である。Table 1 にコイル諸元を示す。77 K、自己磁場におけるコイル I_c は 28 A であった。

コイルには測定時のノイズ低減のために外側・内側にノイズキャンセルコイル (銅線) を巻いた。Fig. 1 にコイルをテストプローブ [3] に取り付けられた状態での写真を示す。表面に見えるのはノイズキャンセルコイル巻線である。

3. 実験方法

磁場中通電試験は LNCMI (グルノーブル強磁場研究所) で行った。20 T 級水冷マグネット (室温ポア 170 mm) にクライオスタットをセットし、液体ヘリウム浸漬冷却とした。磁場を一定値にホールドした後にコイル電圧、ノイズキャンセルコイル電圧をモニタしながらコイルに電流を線形に掃引した。

4. 実験結果

Fig. 2 に本実験で得られたコイル臨界電流 (I_c) の磁場依存性を示す。 I_c は電流増加時の $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ 相当電圧で評価し、測定はゼロ磁場から磁場を増加しながら行った。 I_c は低磁場側で一端増加し、その後減少傾向である。この傾向は [1] および [2] のコイルでも観測されており、テープ線材に誘起される遮蔽電流の効果 [4-6] と考えている。ノイズキャンセルコイルの効果については当日報告する。

参考文献

- [1] H. Kitaguchi et al., Supercond. Sci. Technol. 22 (2009) 045005.
 [2] H. Kitaguchi et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. 21 (2011) 1624.
 [3] Y. Miyoshi et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. 23 (2013) 9500204.

- [4] Y. Koyama et al., Physica C 469 (2009) 694.
 [5] Y. Yanagisawa et al., Physica C 469 (2009) 1996.
 [6] N. Amemiya and K. Akachi, Supercond. Sci. Technol. 21 (2008) 095001.

Table 1 Specification of Bi-2223 superconducting coil

Superconductor	Width	2.7 mm
	Thickness	0.21 mm
	Reinforcement (Cu alloy)	50 $\mu\text{m} \times 2$
	Insulation thickness	12.5 $\mu\text{m} \times 2$
Winding pack	Inner diameter	65 mm
	Outer diameter	83 mm
	Height	60 mm
	Conductor length	109 m
	Number of turns	456
Coil	Inner diameter	41 mm
	Outer diameter	89 mm
	Height (including terminals and flanges)	120 mm
	Inductance	10.6 mH
	I_c at 77 K, s.f.	28 A



Fig. 1 Photograph of Bi-2223 superconducting coil on the test probe.

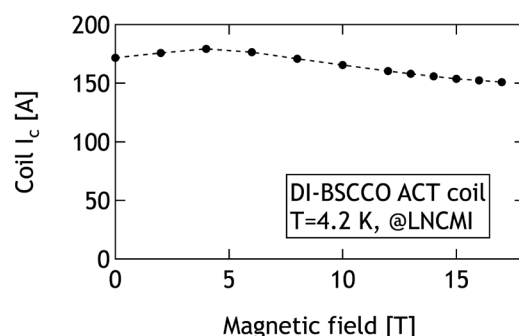


Fig. 2 Coil I_c as a function of magnetic field.

Y 系ダブルパンケーキコイルの遮へい電流磁場解析

Numerical Analysis on Magnetic Field generated by Screening Current in YBCO Double Pancake Coil

植田 浩史, 福田 光宏, 畑中 吉治(阪大); 野口 聡(北大);

齋藤 隼, 有谷 友汰, 狩野 開, 道辻 健太, 王 韜, 王 旭東, 石山 敦士(早大); 渡部 智則, 長屋 重夫(中部電力)

UEDA Hiroshi, FUKUDA Mitsuhiko, HATANAKA Kichiji (Osaka Univ.); NOGUCHI So (Hokkaido Univ.);

SAITO Jun, ARIYA Yuta, KARINO Hiraku, MICHITSUJI Kenta, WANG Tao, WANG Xudong, ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.);

WATANABE Tomonori, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power Co.)

E-mail: hueda@rcnp.osaka-u.ac.jp

1. はじめに

近年、高温超電導技術を活用した SMES, NMR, MRI, 加速器などの研究開発が行われている。高温超電導コイルでは、高温超電導線材がテープ形状をしているため、遮へい電流が顕著に誘導され、それによって生じる磁場がコイルの設計磁場に影響を及ぼし、発生磁場の空間的均一性や時間的安定性を損なう可能性がある。今回は、Y 系超電導線材の小型パンケーキコイルを製作し、遮へい電流によって発生する磁場の測定を行い、電磁場解析と比較検討した。

2. 遮へい電流磁場解析

Y 系超電導線材は超電導層の断面アスペクト比が非常に大きいことから、線材厚み方向で電磁界が一様であると仮定する近似を用いることができるため、厚み方向の積分を実行でき、次式が得られる。

$$\{\nabla \times \rho(\nabla T \times \mathbf{n})\} \cdot \mathbf{n} + \frac{\mu_0 d}{4\pi} \frac{\partial}{\partial t} \int_S \frac{(\nabla T' \times \mathbf{n}) \times \mathbf{R}}{R^3} \cdot \mathbf{n} dS = - \frac{\partial \mathbf{B}_0}{\partial t} \cdot \mathbf{n} \quad (1)$$

ここで、 T はテープ面法線方向の電流ベクトルポテンシャル、 \mathbf{n} はテープ面の法線ベクトル、 d は超電導層の厚み、 \mathbf{B}_0 は外部磁場、 ρ は抵抗率である。積分範囲 S は超電導体の全領域であり、 \mathbf{R} はソース点 \mathbf{r} からフィールド点 \mathbf{r}' に向かうベクトルである。超電導特性は E - J 特性 (n 値モデル) により表現した。超電導線材外の領域は、積分方程式を利用しているため、要素分割は不要であり、精度良く計算が可能である。左辺第 2 項の解析領域全体に亘る積分には、多体間の相互作用の近似値を高速計算する手法として研究されてきた高速多重極法 (FMM: Fast Multipole Method) を適用した⁽¹⁾⁽²⁾。高速多重極法は分割統治アルゴリズムと場の多重極/局所展開を利用して、必要な精度を確保しつつ、多体間の相互作用の近似値を高速計算する手法である (Fig. 1 参照)。例えば、多重極法によってある点でのポテンシャルを評価する場合、評価点の近傍にある粒子からの寄与とそれ以外の粒子からの寄与との二つに分ける。近傍からの寄与は直接計算し、その他の粒子からの寄与は多重極展開を用いて効率よく計算する。

3. 解析結果

実際にダブルパンケーキコイルを用いて行った磁場測定結果⁽³⁾と比較する。ダブルパンケーキコイルは、線材幅 10 mm の Y 系線材を 34 ターン巻いたもので、内径 219 mm、外径 240 mm である。コイル I_c は 100 A であった。解析は実験と同じ条件・手順で、電流掃引速度 20 A/min.、最大電流 100A の三角波とした。実験結果と解析結果を併せて Fig. 2 に示す。プロットは実験結果、実線は解析結果である。磁場測定は、ミッドプレーンからコイル軸方向に 17 mm ずれた平面上で、軸から径方向に $r = 0.0, 95, 100, 105$ mm の 4 点で行った。実験と解析を比較すると、曲線は定性的に一致しており、定量的にもほぼ一致している。以上から、解析手法の妥当性が確認されたと言える。

4. まとめ

Y 系ダブルパンケーキコイルの遮へい電流磁場の実験脚気と解析結果を比較することにより、開発した遮へい電流磁場の解析手法の妥当性を確認した。

なお、本研究の一部は科研費 (若手研究 B: No. 23760260) に依ったことを付記する。

参考文献

1. H. Ueda, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 86 (2012) 2B-a05.
2. H. Ueda, M. Fukuda, K. Hatanaka, T. Wang, A. Ishiyama, S. Noguchi: "Spatial and Temporal Behavior of Magnetic Field Distribution Due to Shielding Current in HTS Coil for Cyclotron Application", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.23, Issue 3, Part 2 (2013), 4100805.
3. T. Wang, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 87 (2013) 2P-p22.

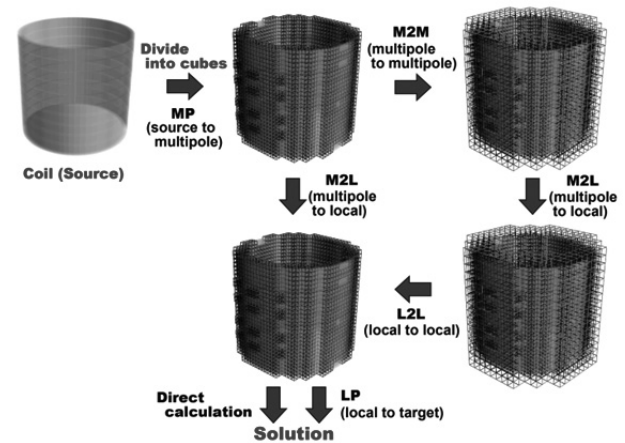


Fig. 1. Example of cell division and procedure of fast multipole method.

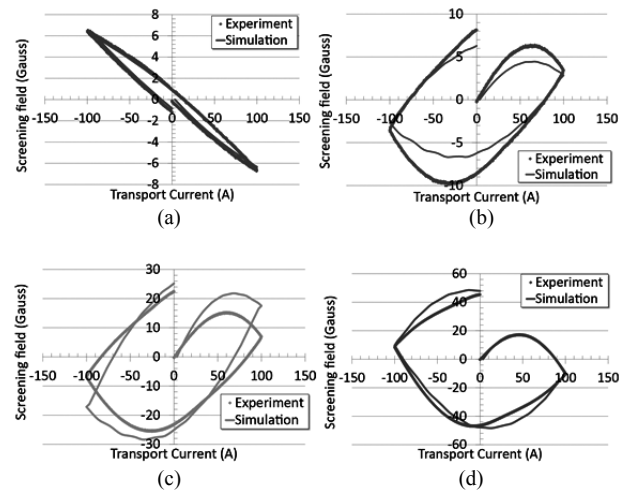


Fig. 2 Numerical results of magnetic field generated by screening current. (a) $r = 0.0$ mm, (b) $r = 95$ mm, (c) $r = 100$ mm, (d) $r = 105$ mm.

SMES 用 Y 系超電導コイルのクエンチ検出と保護

Quench detection and protection of YBCO coil for SMES

中田 恵理香, 荒川 一誠, 南 克彦, 増井 裕太, 王 旭東, 石山 敦士(早稲田大学);
渡部 智則, 長屋 重夫(中部電力); 植田 浩史(大阪大学)

NAKADA Erika, ARAKAWA Issei, MINAMI Katsuhiko, MASUI Yuta, WANG Xudong, ISHIYAMA Atsushi(Waseda Univ.);
WATANABE Tomonori, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power); UEDA Hiroshi (Osaka Univ.)

E-mail: atsushi@waseda.jp

1. はじめに

2012 年度で終了した NEDO プロジェクトにおいて通電容量 2kA, 絶縁電圧 2kV, 運転温度 20K の SMES 用伝導冷却 Y 系超電導コイルの要素技術開発が進められてきた。その中で、我々は結合損失を抑えるために素線絶縁した Y 系積層導体を巻線したコイルの熱的安定性・保護の検討を行ってきた。先行研究にて導体内の素線に局所的な常電導転移が発生した場合、素線間の転流を監視することでクエンチ検出が可能であることを実験と数値解析によって示した[1]。今回は、この結果を踏まえ、外部保護抵抗によるエネルギー回収に基づく安定化層厚の決定法により安定化層厚をもとめたのでその結果を報告する。なお、本研究は「イットリウム系超電導電力技術開発プロジェクト」の一部として NEDO の委託により実施したものである。

2. Y 系線材の安定化層厚の決定

外部抵抗によるエネルギー回収条件より求めた次の式を解くことによって、安定化層厚を決定することができる[2]。

$$\left(t_d + \frac{E}{V_m I_0}\right)^{-1} \lambda_{stab} Z(T_0, T_m) - \left(\frac{I_0}{NS_t}\right)^2 = 0 \quad (1)$$

ここで t_d は遮断遅れ時間, E は蓄積エネルギー, V_m はコイル両端の最大電圧, I_0 はエネルギー回収開始時の運転電流, λ_{stab} は安定化層の占積率, Z は Z 関数(常電導領域が局所的かつ断熱的に発熱・昇温したときの熱的特性を評価する関数), S_t は線材の断面積, N は集合導体の線材の枚数である。式(1)では, $\lambda_{stab} Z(T_0, T_m)$ は運転温度 T_0 , 最高到達温度 T_m と線材の構成・寸法に依存し, 他のパラメータはコイル設計・運転仕様で決まる。 $\lambda_{stab} Z(T_0, T_m)$ が大きくなると許容される電流密度は大きくなるため, $\lambda_{stab} Z(T_0, T_m)$ は許容される電流密度を決定する指標・評価基準と考えることができる。先行研究より, 安定化層厚が厚いほど或いは最高到達温度が高いほど Z 関数は大きくなり, 許容される電流密度は増加することがわかっている。また, 基板厚 d_{sub} が大きくなるほど Z 関数は小さくなっていることがわかっている。ここで, $Z(T_0, T_m)$ を安定化層の厚さ d_{stab} が陽に現れるように変形すると

$$A(T_0, T_m) d_{stab}^2 + B(T_0, T_m) d_{stab} - \left(t_d + \frac{E}{V_m I_0}\right) \left(\frac{I_0}{N \cdot w}\right)^2 = 0 \quad (2)$$

と d_{stab} を未知数とする二次方程式が得られる。係数 $A(T_0, T_m)$, $B(T_0, T_m)$ は, 安定化材の電気抵抗率, 線材の各構成材料の熱容量の温度依存性, 安定化層の厚さ d_{stab} 以外の層厚から算出することができる。

例として, NEDO プロジェクトで想定している 180 個の要素コイル(円形パンケーキコイル)から成る 2GJ-SMES トロイダルコイルの内の 1 要素コイルを対象とした。

計算において外部保護抵抗 $R=0.5, 1.0 \Omega$ を想定した。そして, 常電導転移を検出した時の線材温度(この温度から外部保護抵抗によりエネルギー回収を開始)をパラメータとし, 最高到達温度を 250 K 以下に抑えるために必要な銅安定化

層の厚さをもとめた。要素コイルと想定した YBCO 導体の諸元を Table 1 に, 必要となる銅安定化層の厚さをもとめた結果を Fig. 1 に示す。なお, 安定化材には Cu を想定している。Fig. 1 より, 常電導転移が検出されたときの線材温度が高いほど, また外部保護抵抗が小さいほど, より厚い安定化層が必要であることがわかる。

Table 1 Specifications of YBCO small model

Stored energy of toroidal coil	2.4 GJ	
Number of unit coils	180	
Stored energy of unit coil, E	13.4 MJ	
Transport current, I_0	2.16 kA	
Inductance of unit coil, L (including mutual inductance)	5.74 H	
Dump resistance, R	0.5 Ω	1.0 Ω
Terminal Voltage, V_m	1.08 kV	2.16 kV
Time constant of dumping	11.5 s	5.74 s
Thickness of YBCO layer, d_{YBCO}	1.0 μm	
Thickness of Substrate layer, d_{sub}	100 μm	
Thickness of Reinforce layer, d_{reinf}	700 μm	
Number of tapes in conductor, N	4	
Maximum temperature, T_m	250 K	
Delay until protection mode, t_d	0.5 s	

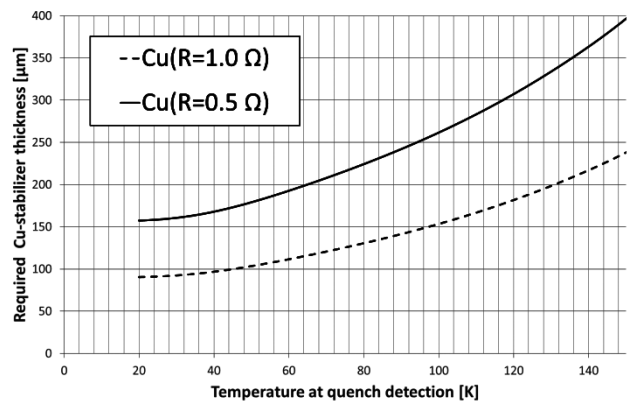


Fig. 1 Dependence of required Cu-stabilizer thickness on temperature at quench detection

参考文献

- Y. Masui, A. Ishiyama, et al.: Abstract of CSJ Conference, Vol. 86(2012) p.136
- A. Ishiyama, H. Ueda, et al.: IEEE Trans. On Applied Superconductivity, Vol. 17, No. 2(2007) pp.2430-2433

ポインティングベクトル法による超伝導変圧器の運転モニタリングシステムの開発 6 — 常伝導転移の観測 —

Development of a Monitoring System of Superconducting Transformer by Using Poynting's Vector Method 6 – Detection of normal transitions –

樋渡 裕紀, 溝上 竜馬, 川越 明史 (鹿児島大学); 江口 徹 (九州電力)
HIWATASHI Hiroki, MIZOUE Ryoma, KAWAGOE Akifumi (Kagoshima University);
EGUCHI Toru (Kyushu Electric Power Co., Inc.)
E-mail: k1219098@kadai.jp

1. はじめに

超伝導変圧器の実用化には、運転中に巻線の健全性を常時監視するシステムの開発が必要である。そこで我々は、ポインティングベクトル法を応用した超伝導変圧器の非接触型運転モニタリングシステムを提案している。

これまでに、本システムを小型の超伝導変圧器に適用し、次のことを実証している。①鉄心を持つ変圧器でも本システムが適用可能である。②一次巻線と二次巻線のどちらで発生した異常かを判別可能である。③接続された負荷が変動していても、巻線の異常を検出できる。④巻線に生じた局所的な異常を検出することができる[1][2]。実際に超伝導変圧器を運転する際には、本システムによって得られる信号から、巻線の異常がどの程度であるかを判断する必要がある。そこで今回は、異常発生部分の温度を変化させ、その時の本システムによる測定信号と巻線温度との関係について調べた。

2. 本監視システムの測定方法及び装置概要

我々の提案しているポインティングベクトル法では、電界測定用と磁界測定用の1対のピックアップコイルを用いて、それぞれで局所的な電界と磁界を測定し、それらの外積からポインティングベクトルを求めている。巻線の状態の情報は、線材の交流損失の大きさに含まれる。そこで本測定法では、ポインティングベクトルを1周期時間積分した有効電力成分(エネルギーフロー)のみを観測する。そのために、磁界の信号電圧を用いて、電界の信号電圧から誘導性の成分をキャンセルする。これにより、異常測定の検出感度を高め、室温空間からの測定を可能としている。巻線に異常が生じると、巻線周辺のエネルギーフローが変化するため、異常発生箇所周辺に設置したピックアップコイル対により、それを検出できる。

実験には、高さ約120 mm、一次側内径106 mm、二次側内径70 mmの試験用超伝導変圧器を使用した。一次巻線と二次巻線には、77 K、自己磁界中での臨界電流がそれぞれ52 Aと115 Aの高強度 Bi-2223 多芯テープ線材を使用した。

3. 実験

一次巻線に21 A_{rms}、50 Hzの交流電流を通電し、一定負荷運転時における異常発生箇所周辺のエネルギーフローを測定した。異常の発生には、一次巻線端部の一部に室温の窒素ガスを吹きつけ、その部分を局所的に常伝導転移させる方法を用いた。超伝導変圧器及びピックアップコイル対の設置箇所を Fig. 1 に示す。異常発生部に1セットのピックアップコイル対を設置した。

異常発生部で観測されたエネルギーフローの変化を Fig. 2 に示す。Fig. 2の縦軸は、正常時の値で規格化した規格化エネルギーフローであり、横軸は測定開始からの経過時間である。図中に灰色で示された部分は、窒素ガスの噴射時間である。巻線温度については、巻線に取り付けた温度計の不具合により、正確な巻線温度の測定が行えなかった。

Fig. 2 より、窒素ガスが噴射されると、測定信号が上昇し、

やがて下降に転じていることがわかる。これは、測定している巻線の交流損失に相当する信号が、常伝導転移に伴い消失したためであると考えられる。なお、鉄心を持たない空芯超伝導コイルにおいては、測定信号の落ち込みを観測することにより、巻線温度が臨界温度近傍まで上昇しているという判断が可能であることが実証されている。

4. まとめ

超伝導変圧器の一次巻線端部に局所的な異常を発生させ、異常検出試験を行った。その結果、空芯超伝導コイルと同様な測定信号の変化を観測することができた。この結果は、巻線に常伝導転移が発生したかどうかを判断するための情報として有効と考えられる。巻線温度の変化と測定信号の変化との詳細な関係については、今後検討を行う必要がある。

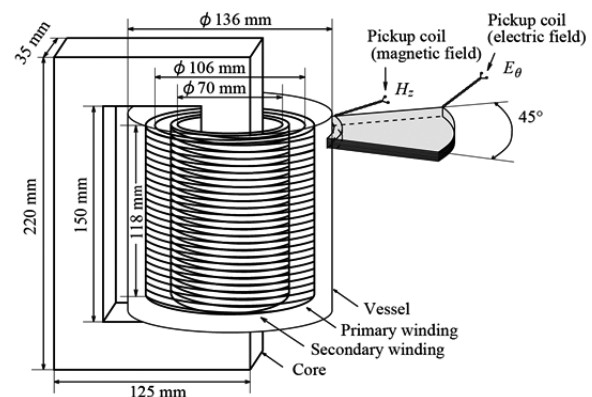


Fig. 1 Measuring system to detect locally abnormal condition in HTS transformer.

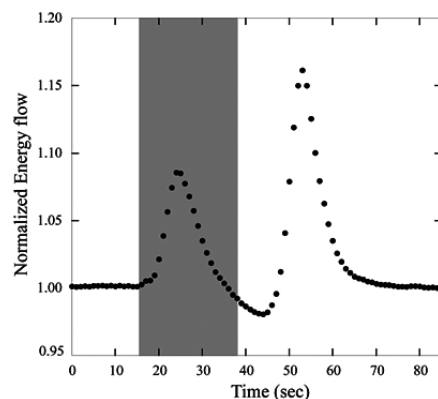


Fig. 2 Results of tests on detection of a normal transition.

参考文献

1. A. Kawagoe, et al.: TEION KOGAKU (J. Cryo. Super. Soc. Jpn.), 47 (2012) p. 268
2. H. Hiwatashi, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 86 (2012) p. 132