

SMES 用 YBCO コイルを想定した常電導転移検出法

Experiments and Simulation on Detection of Normal Transition for YBCO Coil for the Application of SMES

南 克彦, 中田 恵理香, 荒川 一誠, 増井 裕太, 王 旭東, 石山 敦士(早稲田大学);
植田 浩史(大阪大学);渡部 智則, 長屋 重夫(中部電力);
MINAMI Katsuhiko, NAKADA Erika, ARAKAWA Issei, MASUI Yuta, WANG Xudong
ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.); UEDA Hiroshi (Osaka Univ.);
WATANABE Tomonori, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power);
E-mail: minami-373-katsu@moegi.waseda.jp

1. はじめに

我々はSMES応用を想定したY系コイルの熱的安定性と保護について検討している[1]。高温超電導コイルにおいて局所的な常電導転移が発生した場合、常電導転移に伴う電圧は極めて小さく、先行研究より、従来の電圧監視法ではY系コイルの局所劣化による常電導転移検出が困難であることを示した。これに対して、我々はSMES用のkA級集合導体内の電流転流を監視することにより、局所的な常電導転移の検出が可能であることを示してきた[2]。今回は、実応用を想定して、導体内電流転流現象を具体的にどのように検出するかについて実験と解析に基づく検討を行ったので報告する。

2. 実験方法

実験は4枚のYBCO線材(厚さ317 μ m, 幅10mm)を積層バンドル化した集合導体を用いたFig.1(a)に示すダブルパンケーキコイル(内径200mm, 外径242mm, 16ターン \times 2)を使用し、伝導冷却下(77K)で行った。素線に加わる熱的擾乱を模擬するために、ひずみゲージ(240 Ω)をヒータとし、これをFig.1(b)に示すダブルパンケーキコイル間にあるわたり部分の各素線長手方向2cmの区間の2カ所に設置し、その両端に電圧タップを設けた。また、Fig.1(c)に示すようにコイル端部の4枚の線材の上部にホール素子を設置し、電流により発生する磁場を感知して出力されるホール素子電圧から各線材電流を間接的に測定した。

実験は次に示す手順で行った(Fig.2)。供試コイルに50Aから100Aの間で変動する三角波パルス電流(1パルス:10s)を計5回、50秒間通電した。一つ目のパルスが発生すると同時にひずみゲージによる熱擾乱(0.6W)を15秒間加え、ヒータ両端電圧と、ホール素子による各素線電流の測定を行った。

3. 実験結果

tape3にヒータを15秒間投入し、常電導転移させた場合の各電流波形をFig.2に示す。また、その時のコイルの全体電圧波形とtape3のヒータ両端電圧波形をFig.3に示す。ここで、

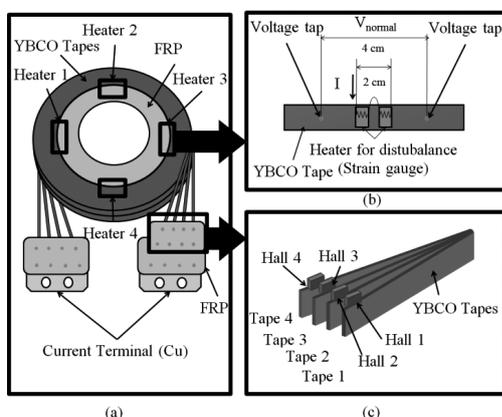


Fig.1. Schematic drawings of (a) double pancake coil, (b) arrangements of heaters and voltage taps, and (c) arrangements of Hall probes.

次のように電流転流による常電導転移検出を行った。まずヒータを加えない状態(常電導転移が生じていない状態)での電流合計値(コイル通電電流)に対する各線材の電流配分の割合を α とする(Table1)。局所的な常電導転移に伴い電流転流が発生すると、各線電流の α が変化する。そしてここでは α が0.05(5%)変化したときにLabVIEWを用いてこれを自動的に検知し、そのときを常電導転移が検出された時間とした。実験の結果、Fig.2よりヒータ投入約5.5秒後にtape3の α が0.05減少しているのを検知することができた。一方、Fig.3よりヒータ投入後約5.3秒で常電導電圧(ヒータ両端電圧)が発生しているのが確認できた。

以上より、今回行った電流転流検出法は、局所的な常電導転移を早期に検出できる方法として有効であることが示された。一方、ヒータ両端電圧はノイズに埋もれ、コイル両端電圧で検出することはできなかった。

Table1. Ratio of Unbalanced Current of Each Tape to Total Current

	tape1	tape2	tape3	tape4
Ratio(α)	0.144	0.354	0.386	0.116

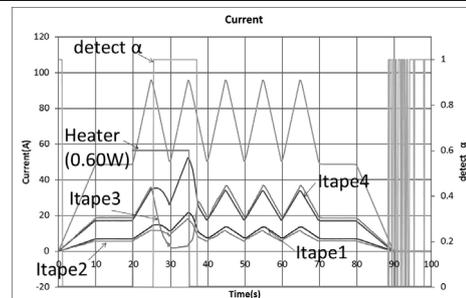


Fig.2. Experimental results of current distribution.

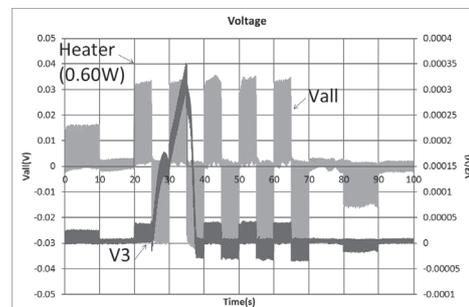


Fig.3. Experimental results of voltage.

参考文献

1. K. Shikimachi, et al.:IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 19, no. 3, pp. 2012-2018
2. H. Ohnishi, et al.:IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol. 23 (2013), 4701404

REBCO コイルにおける外部磁場遮断の影響

Influences of external magnetic field shutdown on the REBCO coils

武藤 翔吾, 小黑 英俊, 淡路 智, 渡辺 和雄(東北大);

宮崎 寛史, 花井 哲(東芝); 大保 雅哉, 飯島 康裕(フジクラ)

MUTO Shogo, OGURO Hidetoshi, AWAJI Satoshi, WATANABE Kazuo (Tohoku Univ.);

MIYAZAKI Hiroshi, HANAI Satoshi (Toshiba); DAIBO Masanori, IJIMA Yasuhiro (Fujikura)

E-mail: s.muto@imr.tohoku.ac.jp

1. はじめに

REBCO 線材は強磁場中においても高い臨界電流密度を維持することができ、また高い耐応力特性を持つことから、次世代の強磁場超伝導マグネットへの応用が期待されている。強磁場センターでは、この REBCO 線材を用いた 25T 無冷媒超伝導マグネット開発が進められている[1]。

REBCO コイルは高い電流密度で運転できることに強みを持つが、熱暴走により焼損する例が報告されている[2]。熱暴走を起こさないというコイル保護の観点では、どのような運転状況においても熱暴走を起こさないことが必要となる[3]。REBCO コイルの運転条件として最も厳しいケースはアウトサートの低温超伝導(LTS)マグネットがクエンチした場合である。LTSコイルがクエンチすると、電磁誘導により REBCO コイルに電流が誘起される。回路構成によっては REBCO コイルに非常に大きな誘起電流が流れることになり、最悪の場合、熱暴走を引き起こす。熱暴走が引き起こされる条件として、コイル I_c を大きく超えて電流が流れると、最終的には熱暴走に至ると考えられているが、まだ実験的に明らかになっていない。そのため、実際に LTS マグネットがクエンチした際、熱暴走が起こる条件についての指針を与える必要がある。

よって、本研究では LTS マグネットをクエンチさせることで、REBCO コイルに電流を誘起させ、コイルの I_c に対して、どの程度の負荷率まで許容できるかを調査した。

2. 実験方法

実験に用いた試験コイルは、二枚のシングルパンケーキ(CoilA, CoilB)を積層させた二積層シングルパンケーキコイルである。線材はフジクラ社製 GdBCO 線材を使用した。各シングルパンケーキコイルおよび線材の諸元を Table.1 に示す。試験コイル間はエポキシによって接着され、最外層にて線材の端同士が銀プレートによって電気的に接合されている。また、アルミ冷却板が上部の CoilA に取り付けられており、これによりコイル全体を冷却する。

この試験コイルを伝導冷却式のクライオスタットに組み込み、クライオスタットを大口径 5T 無冷媒超伝導マグネットに挿入した。大口径 5T 無冷媒超伝導マグネットは NbTi コイルに 186.7 A 通電することで $\phi 220$ mm の室温ボアに 5 T を発生させることができる。NbTi コイルにはダイオードおよび保護抵抗がそれぞれ並列に接続されている。ダイオードはマグネット内部に設置され、保護抵抗は外部に設置されている。試験コイルはクライオスタット外部に設置された保護抵抗とのみ接続されている。

遮断試験は次のように実施した。まず、NbTi コイルのクエンチは電源を遮断することで行った。電源を遮断することで試験コイルに電流を誘起させる。誘起電流は保護抵抗の値を変化させることによって電流値を制御した。

3. 実験結果

NbTi コイルを遮断した際、試験コイルの誘起電流および中心磁場の時間変化を Fig.1 に示す。左縦軸に誘起電流、右縦軸に中心磁場、横軸に時間を示した。 $t = 0$ s において NbTi

コイルの電源を遮断した。保護抵抗を 1, 0.1, 0.028 Ω と変化させたときの誘起電流を図中に示している。電流は保護抵抗が減少するにしたがって増加した。保護抵抗を 0.028 Ω としたときに最も多く流れ、最大 206 A であることがわかった。中心磁場は、保護抵抗を 0.1 Ω とした際の結果を図中に示している。 $t = 1$ s 付近から減衰しはじめ、 $t = 8$ s にはほぼ完全に減衰している。これらの遮断時において試験コイルの I_c は 500 A 以上であり、負荷率が低い場合では焼損による劣化がないことがわかった。

当日は、コイルの I_c に対して負荷率を変化させた実験結果と併せて報告する。

謝辞

本研究の一部は科学研究費補助金(基板 A)の補助を受けて実施しました。

参考文献

1. S. Awaji *et al.*, Abstract of CSJ Conference **87** 3A-p05 (2013)
2. S. Matsumoto *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **22** 9501604 (2012)
3. H. Miyazaki *et al.*, Abstract of CSJ Conference **88** 1A-p04 (2013)

Table.1 Specifications of the sample coil

	CoilA	CoilB
Conductor length [m]	53	53
Thickness of conductor [mm]	0.225	0.230
Coil height [mm]	4.24	4.23
Inner diameter [mm]	94.6	94.6
Outer diameter [mm]	169.6	169.1
Number of turns	126	126
Inductance [mH]	2.91	2.99
Total inductance [mH]	10.3	

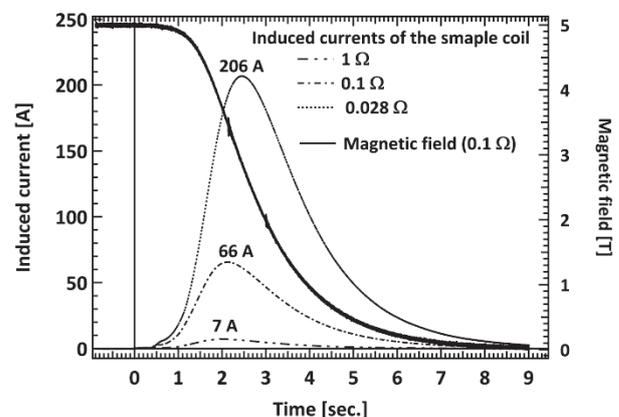


Fig.1 Time dependent behaviors of the induced current and the magnetic field

非絶縁 REBCO パンケーキコイルにおける 熱暴走からの自律的な回復メカニズムの解明

Mechanism of self-healing from thermal runaway for an uninsulated REBCO pancake coil

柳澤 吉紀(理研);佐藤 耕太, 柳澤 杏子, 中込 秀樹(千葉大);金 新哲, 高橋 雅人, 前田 秀明(理研)
YANAGISAWA Yoshinori (RIKEN); SATO Kota, YANAGISAWA Kyoko, NAKAGOME Hideki (Chiba Univ.);
JIN Xinzhe, TAKAHASHI Masato, MAEDA Hideaki (RIKEN)

E-mail: y.yanagisawa@gsc.riken.jp

1. はじめに

REBCO コイルの強みを活かした高電流密度(たとえば 500 A/mm²)での運転時に熱暴走が起こると、わずかにコンマ数秒の短い時間で巻線の焼損に至るため、コイルを保護することができない。近年、REBCO コイルの保護法として提案された非絶縁法では、コイル臨界電流を超えて通電した時に起こる熱暴走が自動的に収まる現象が報告されている[1]。この現象は高電流密度の REBCO コイルの保護法として有用である可能性があるが、そのメカニズムは明らかになっていない。本研究では非絶縁コイル特有の回路モデルを用いた解析と小型コイルによる実験により、この現象のメカニズムをはじめて明らかにした。

2. 数値解析手法

非絶縁コイルにおけるターン同士の電気的な接触を考慮した数値解析手法を構築した。コイル内の電流分布を回路方程式で、温度分布を 1 次元有限要素法で求めこれらを組み合わせて解析した。回路モデルでは、パンケーキコイル内の各ターンを多数の節点からなる要素に分割する。各要素は線材の自己インダクタンス、相互インダクタンス、抵抗を含んでおり、それぞれの節点は接触抵抗を介して隣接する内側と外側のターンと接続している。内径 30.0 mm、外径 37.1 mm、高さ 4.1 mm、巻き数 37 のコイルを液体窒素中で通電した場合の熱暴走を解析した。臨界電流値は 80 A とした。

3. 解析結果と議論

Fig.1(a), (b), (c) はコイル電圧、中心磁場、コイル内温度の解析結果である。Fig.2(a), (b), (c) は電源電流がそれぞれ 76 A、125 A、265 A の場合におけるコイル巻線部の電流分布と温度分布の解析結果である。Fig.1(a), (b)に示すように 80 A 以下では、中心磁場は電流に比例して増加しており、コイル両端電圧は 0 のままである。また、Fig.2(a)に示すように電流は周方向に沿って超伝導体に流れており、ジュール発熱は発生せず、コイル内温度は 77 K に保たれている。このときコイルはアンペアターン $N \times I$ の“マルチターンモード”であるという。導体電流密度は 190 A/mm² である。

臨界電流値 80 A を超えると、自然熱暴走によりコイル両端電圧は 0.39 V まで急峻に上昇するが、その後は 150 A まで安定的に増加する(Fig.1(b)参照)。80 A において中心磁場は 117 mT から 4.1 mT まで急激に低下し、その後 150 A までは徐々に上昇する。Fig.2(b)に示すように 125 A において電流は電極付近に集中する。電流は正電極から拡散するように巻線部に広がり、負電極において収束する。このとき周方向の

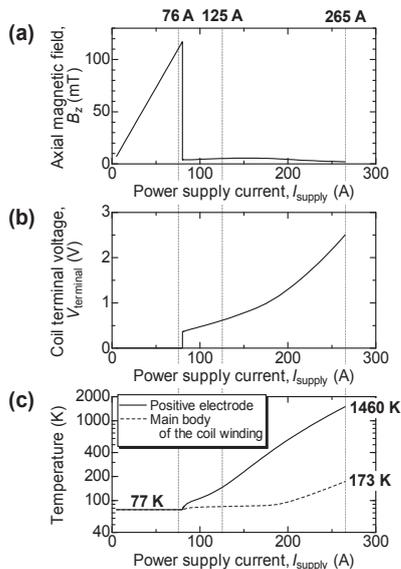


Fig.1 Simulated results for the 37-turn uninsulated REBCO pancake coil: (a) central magnetic field, (b) coil terminal voltage, and (c) temperature of the coil.

導体電流密度 J_θ はわずか 13.2 A/mm² である。このように、自然熱暴走の後には、最も抵抗の小さいパスに電流が流れることで導体電流密度が大幅に低下し、ジュール発熱が激減する。中心磁場の減衰は初期値の 1/33.2 となっている。つまり、自然熱暴走後、コイルの各ターンがまとめて 1 ターン分として振る舞う“シングルターンモード”へと転移することで、熱暴走からの自律回復が起こるのである。

150 A から 265 A の間では、コイル両端電圧は非線形に上昇しており、コイル中心磁場はさらに減衰する(Fig.1(a),(b)参照)。265 A においては、Fig.2(c)に示すように、正電極付近に電流が集中している。Fig.1(c)と Fig.2(c)に示すように、電極から反対側の巻線部の導体電流密度は 4.39 A/mm² であり、温度は 200 K 未満にとどまっている。一方で、正電極付近の温度は銅の融点を超えた 1460 K まで上昇しており、両電極を含む超高温領域が形成されている。このように径方向への電流成分が支配的になり、正電極から負電極へ直接電流が流れる“電極間ショートモード”になる。これらの現象は実験でも確認された。このモードにおいては、過度な温度上昇と周方向応力の発生によるコイルの損傷が起こる可能性があり、回避する必要がある。

4. まとめ

非絶縁パンケーキコイルでは、自然熱暴走により電流分布が通常時のマルチターンモードからシングルターンモードに転移してジュール発熱量が激減する。これにより熱暴走が自律的に回復し、コイルが過度な温度上昇から保護されることを明らかにした。さらに電流を増やすと電極間ショートモードとなり、巻線の損傷に至り危険なため、これを避ける必要がある。

参考文献

- Hahn et al, IEEE Trans. Appl. Supercond., 21, 1592-1595, 2011.

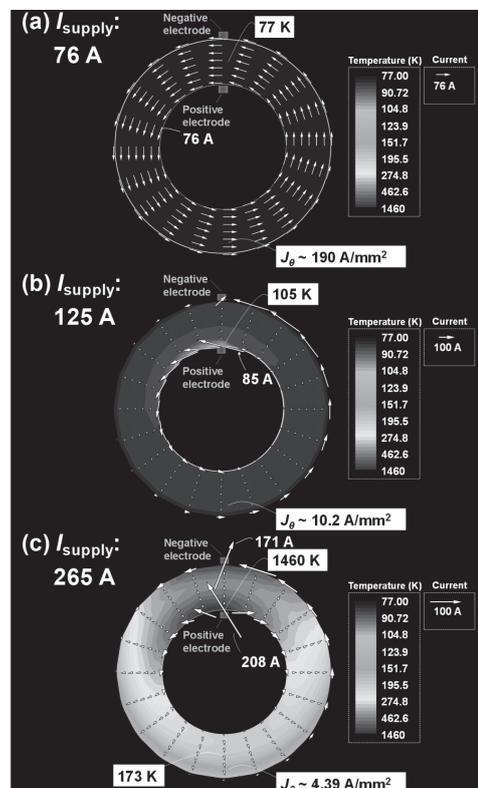


Fig.2 Simulated results on current flow and temperature distribution in the 37-turn uninsulated REBCO pancake coil for (a) 76 A, (b) 125 A, and (c) 265 A. Current vectors and temperature contours are represented by white arrows and by color gradation, respectively.

非絶縁 REBCO レイヤー巻コイルにおける電流フローモード転移

The current flow mode transition for an uninsulated REBCO layer wound coil

佐藤 耕太, 柳澤杏子, 中込 秀樹(千葉大); 柳澤吉紀, 前田 秀明(理研)

SATO Kota, YANAGISAWA Kyoko, NAKAGOME Hideki (Chiba Univ.); YANAGISAWA Yoshinori, MAEDA Hideaki (RIKEN)

E-mail: kotasato@chiba-u.jp

1. はじめに

REBCO などの高温超伝導コイルの高電流密度化、熱的安定性の向上などの利点を持つ技術として、非絶縁法[1]が提案されている。我々は前報で、非絶縁 REBCO パンケークコイルは、コイル臨界電流を超えた領域で起こる自然熱暴走がトリガーとなり、電流分布が通常の“マルチターンモード”から“シングルターンモード”に転移することで熱暴走から自律的に回復することを明らかにした[2]。この現象は高電流密度 REBCO コイルにおける熱暴走からのコイル保護方法として使用できる可能性がある。しかしながら、高精度磁場が必要とされる NMR 磁石や MRI 磁石で使用されるレイヤー巻きコイルにおいて、この種の自律回復現象がどのように起こるかは明らかでない。そこで本研究では、この非絶縁のレイヤー巻き REBCO コイルにおける熱暴走から自律回復現象について調べ、コイル保護の観点から課題を議論した。

2. 実験方法

SuperPower 社製 (SCS4050) の 4 mm 幅、0.1 mm 厚の裸線材を使用し、1 レイヤーあたりのターン数 12、レイヤー数 6 (すなわち総ターン数 72) の非絶縁 REBCO レイヤー巻きコイルを製作した。巻線内径、巻線外径、巻線長さはそれぞれ 30 mm, 30.15 mm, 52.2 mm である。線材の総長は 7.02 m である。ロードラインから見積られるコイル臨界電流は 75 A である。正電極と負電極は共にコイル上端部に接続した。コイル内の軸方向磁場を測定するためにホール素子をコイル上部($B_{z,upper}$)、コイル中心部($B_{z,center}$)、コイル下部($B_{z,lower}$)に設置した。励磁速度 0.167 A/s、電源の遮断電圧 5 V にて液体窒素中でコイルの通電を行った。コイルには電圧タップと熱電対を複数設置した。

3. 実験結果と考察

Fig.1(a)に通電電流に対するコイルの上端磁場 $B_{z,upper}$ 、中心磁場 $B_{z,center}$ 、下端磁場 $B_{z,lower}$ 、Fig.1(b)に通電電流に対するコイル両端電圧を示す。電源電流が 100 A の時に電圧が 0.3V まで上昇するもののすぐに 0.13V まで落ち、パンケークコイルの場合[1]と同様に、電流分布モードの転移が起き、熱暴走から自律回復した。電流モード転移前後で磁場の値を比較すると、 $B_{z,upper}$ では 24.9%、 $B_{z,center}$ では 29.1%、 $B_{z,lower}$ では 27.6%にまで減衰している。電流分布モード転移による磁場の減衰率はパンケークコイルの場合と比べ大きく異なる。前報で報告した 37 ターンのパンケークコイルでは、モード転移により磁場の値 3.5%にまで減衰し、これはターン数分の一の割合に近い値である[1]。一方今回のソレノイドコイルでは磁場が上述の通り 25-29%にまでしか減衰していない。これは、レイヤー数分の一の値(すなわち $1/6 = 17\%$)に近い。すなわち、非絶縁レイヤー巻きコイルにおいて、電流分布の転移がコイル径方向において生じている。つまり、シングルパンケークが 12 個積層された系において、各パンケークコイルごとに、電流分布モードが“マルチターンモード”から“シングルターンモード”へと転移しているのと同様の現象が起きているの

である。

コイル上端部・中心部・下端部における磁場の減衰率を比較すると、上述の通り $B_{z,upper}$ の減衰が最も大きい。これは、正電極・負電極の設置されたコイル上端において、電流密度がより低くなっていることを意味する。このようにコイル内部において軸方向に電流密度の勾配が生じると、線材を軸方向に引っ張る電磁力が生じる。そのため、電流分布のモード転移が起きた時に、コイル内部で線材が移動したり、コイルが損傷したりする可能性がある。非絶縁法をレイヤー巻きコイルに適用するには、この点についてさらなる検討が必要である。

電源電流をさらに上げていくと、コイル上端部の最外レイヤーにおける線材(すなわち負電極の付近)が焼損する現象が見られた。これは、コイルの口出し部分においては電流密度が非常に高くなるためである。

4. まとめ

非絶縁のレイヤー巻き REBCO コイルでは、パンケークコイルの場合と同様に、電流分布のモード転移が起こり、熱暴走から自律回復する。ただし、このとき電極を設置したコイル上端部の電流密度が低くなるため、コイル内に軸方向にわたって電流密度の勾配が生じる。この種の電流密度勾配は線材をコイル軸方向に引っ張る電磁力を発生させるため、コイルを損傷させる可能性がある。

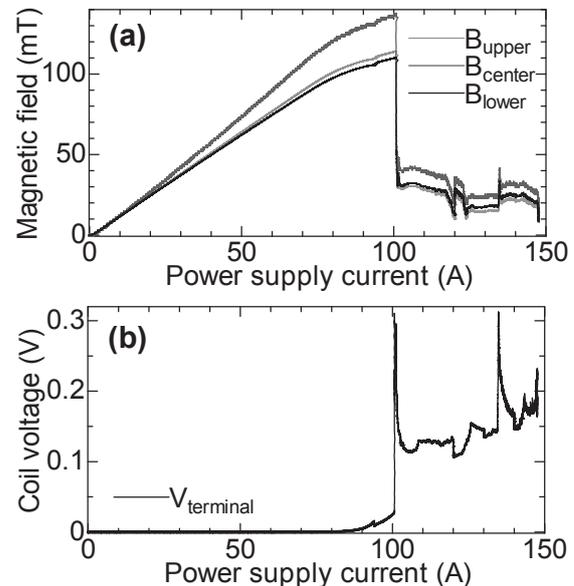


Fig. 1. (a) Magnetic field intensity of B_{upper} , B_{center} , B_{lower} as a function of transport current. (b) Coil terminal voltage as a function of transport current.

参考文献

- Hahn et al, IEEE Trans. Appl. Supercond., 21, 1592-1595, 2011
- 柳澤他, 2013年度秋季低温工学・超電導学会, 1A-a03.

No-insulation ReBCO コイルのターン間接触抵抗の影響についての 数値シミュレーションによる検討

Deliberation of influence of turn-to-turn resistance in No-insulation ReBCO coil with numerical simulation

野口 聡, 伊藤 竜誠(北大); 王 韜, 王 旭東, 石山 敦士(早大); Hahn Seungyong, Iwasa Yukikazu (MIT)
NOGUCHI So, ITO Ryusei (Hokkaido University);
 WANG Tao, WANG Xudong, ISHIYAMA Atsushi (Waseda University);
 HAHN Seungyong, IWASA Yukikazu (Massachusetts Institute of Technology)
 E-mail: noguchi@ssi.ist.hokudai.ac.jp

1. はじめに

近年, 無絶縁 ReBCO テープ線を用いたコイルの巻線技術に注目が集まっている. 無絶縁コイルは通電電流がテープ線間を迂回して流れることができる構造をしており, 安定性に優れていることが実験的に分かっている[1]. 特に, 高磁場内での動作性と安定性を求められる ReBCO コイルにおいて, 無絶縁テープ線の巻線技術の適用が望まれている. しかしながら, 無絶縁 ReBCO コイルの過渡特性の詳細な調査は現在までに行われていない. 本稿では, 無絶縁 ReBCO コイルの過渡電流下での特性を, 数値シミュレーションを用いて調査している. 数値シミュレーションでは巻線の持つインダクタンスと E - J 特性, テープ線間の接触抵抗を含めた等価回路を提案しており, 無絶縁 ReBCO コイルを励磁した際の端子電圧と中心磁界特性, 電流分布を示す.

2. シミュレーション手法

無絶縁 ReBCO コイル (NI-ReBCO コイル)の概観図を Fig. 1(a)に示す. シミュレーションに用いた等価回路では, (1)区分化した NI テープ線において, それぞれが持つ自己, 相互インダクタンス L, M , (2)鎖交磁界の強度依存性と c 軸異方性を考慮した, E - J 特性に起因する仮想抵抗 R_{sc} , (3)テープ線の厚みと幅を考慮した, コイル周方向の導通経路における母材抵抗 R_{mx} , (4)電流の迂回路における線間抵抗 R_{ct} を考慮している(Fig. 1(b)). 実際の NI-ReBCO コイルの等価回路は, Fig. 1(b)に示したものが連結した形になる. キルヒホッフの法則に基づいて, この等価回路の各部に流れる電流を未知数とした回路方程式を解くことで端子電圧と電流分布を算出している. インダクタンス L, M は解析的に算出しており, 線間抵抗 R_{ct} は母材の電気抵抗率と接触抵抗を考慮した推定値を用いている.

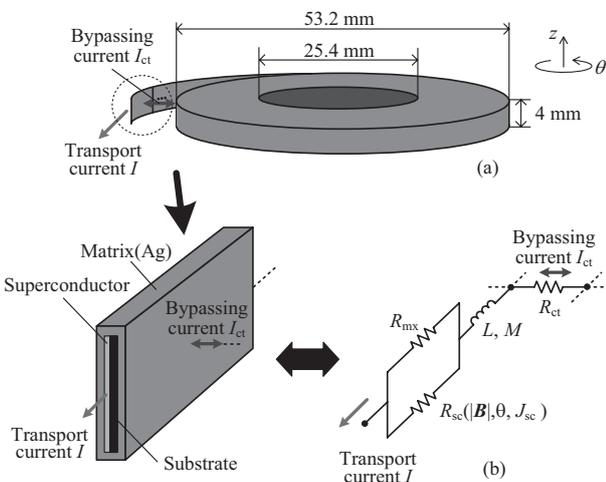


Fig. 1. Conceptual view of (a) the NI-HTS single pancake coil and (b) equivalent circuit of discretized NI-HTS tape including contact resistance.

3. シミュレーション結果

シミュレーションでは, 167 s をかけて電流を 460 A まで増加させた場合の NI-YBCO コイルの端子電圧 V_c と中心磁界 B_c を調査した. 運転温度は 4.2 K を想定しており, 中心磁界は電流の分布を考慮して解析的に算出している. シミュレーション結果を Fig. 2 に示す.

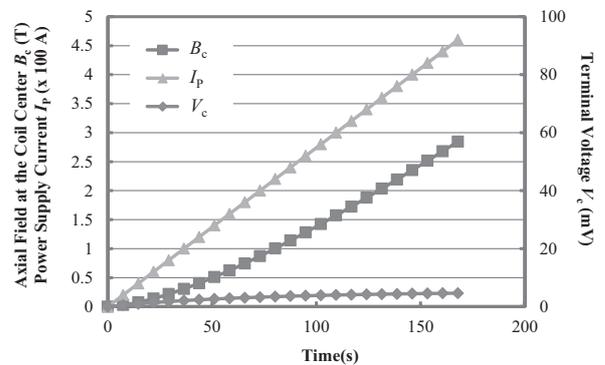


Fig. 2. Time transition of the axial field at the coil center B_c , power supply current I_p and terminal voltage V_c .

電流の増加に伴って, 中心磁場は約 2.8 T 程度まで大きくなっている. 同寸法の YBCO パンケーキコイルの実験結果とよく一致しており, 解析結果は妥当であると考えられる.

Fig. 3 は電源から 200 A の電流を供給している時の電流分布を示している. 最内周に流入した電流は, テープ線の超電導層を周方向に沿って流れつつ, コイルの厚みの中間部にかけて徐々に迂回して流れている. 中間部から最外周にかけて, この部分ではテープ線間の接触面積が広いので, 等価的に線間抵抗 R_{ct} が小さくなり, 迂回電流 I_{ct} が大きくなっていることが分かる. このため, コイルの厚みの中間部に到達した通電電流 I は即座に最外周に迂回していることが分かる.

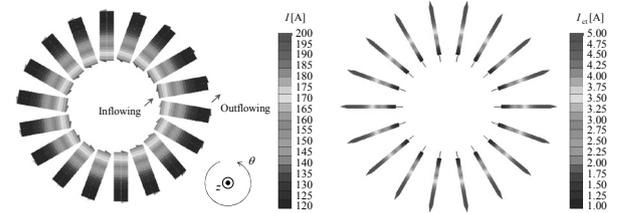


Fig. 3. Current distribution of the transport current I and bypassing current I_{ct} . The transport current I flow in a circumferential direction. The bypassing current I_{ct} flow in a radial direction.

参考文献

1. S. Hahn, D. K. Park, J. Bascuñán, and Y. Iwasa, "HTS pancake coils without turn-to-turn insulation," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 21, no. 3, pp. 1592-1595, 2011.

No-Insulation REBCO パンケーキコイルの励磁特性に関する実験と簡易解析

Experiments and numerical analyses on charging characteristics for no-insulation REBCO pancake coils

荒川 一誠, 南 克彦, 中田 恵理香, 増井 裕太, 王 韜, 王 旭東, 石山 敦士(早稲田大学);
野口 聡(北海道大学); Seungyong Hahn, Yukikazu Iwasa (MIT)

Arakawa Issei, MINAMI Katsuhiko, NAKADA Erika, MASUI Yuta, WANG Tao, WANG Xudong,
ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.); NOGUCHI So (Hokkaido Univ.); HAHN Seungyong, IWASA Yukikazu (MIT)
E-mail: issei.arakawa@ruri.waseda.jp

1. はじめに

近年, HTS 線材間の絶縁を取り除いて巻き線された HTS No-Insulation コイルの研究が各所で盛んに進められている。No-Insulation コイルは高電流密度化が可能であり、クエンチによるコイル焼損リスクの低減などが利点として挙げられる。また、高い熱的安定性を有しているため、従来のような事故保護が不要である可能性が示唆されている。一方で、層間接触によって発生磁場に遅れが生じることが報告されている[1][2]。そこで今回は、実験と簡易回路解析により No-Insulation コイルの層間接触抵抗と磁場発生との関係を評価した。

2. 実験方法・手順

本実験に用いた No-Insulation REBCO シングルパンケーキコイルを Fig.1 に示す。このコイルは線材幅 4mm, 線材厚 63 μm , 銅安定化層が両側に 5 μm ずつの線材で巻き線されている。実験は試作した 60 ターンのコイルから巻き線張力を一定に保ちながら 20 ターンずつ取り除いた 3 種類のコイルによって行った。それぞれの諸元を Table.1 に示す。これらのコイルに対して励磁速度を変えて励磁試験を行った。今回、実験に用いたコイルはターン数が少ない小口径コイルである。そこで、発生磁場の時間遅れを評価するために、Fig.2 に示す等価回路を用いて簡易解析を行った。式(1)~式(3)に回路方程式を示す。ここで、通電電流 I_{op} , 周方向電流 I_{θ} , 超電導層電流 I_{sc} , 安定化層電流 $I_{stabilizer}$, コイルインダクタンス L_{coil} , 層間接触抵抗 R_c , 安定化層の抵抗 $R_{stabilizer}$ である。なお、超電導特性には式(2)に示すように n 値モデルを用いている。

$$L_{coil} \frac{dI_{\theta}}{dt} + R_{stabilizer} I_{stabilizer} = R_c (I_{op} - I_{\theta}) \quad (1)$$

$$R_{stabilizer} I_{stabilizer} = V_c \left(\frac{I_{sc}}{I_c} \right)^n \quad (2)$$

$$I_{stabilizer} + I_{sc} = I_{\theta} \quad (3)$$

3. 実験結果・まとめ

結果の一例として 60 ターンの時の実験結果と簡易解析結果を Fig.3(a)(b)に示す。また、Table.2 に各コイルの磁場の時間遅れの結果をまとめる。Fig.3(a)と Fig.3(b)を比較すると、励磁速度 5A/s, 10A/s, 20A/s のすべての場合において、通電電流波形に対するコイル中心磁場 B_z の遅れについて簡易解析結果は実験結果を良く再現している。よって、今回の様な小口径 NI コイルにおいては、磁場の時間遅れは Fig.2 および式(1)~(3)で示すような層間接触抵抗と超電導特性の非線形性を考慮した等価回路によって評価することができた。今後は巻数が多い大口径コイルについて検討を進めていくとともに、コイル内部のより詳細な数値解析を行い、No-Insulation コイルの熱的、電気的振る舞いを評価していく予定である。

参考文献

- Xudong Wang, et al.: Supercond. Sci. Technol., 26 (2013) 035012
- Hahn S, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., 21 (2011) 1592-5

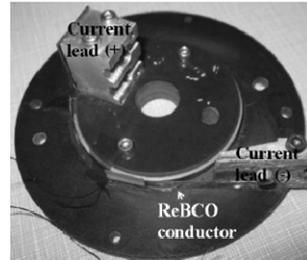


Fig.1 No-Insulation REBCO pancake coil

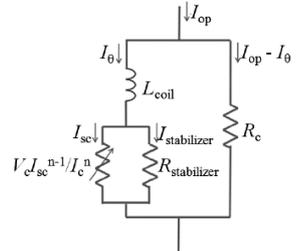
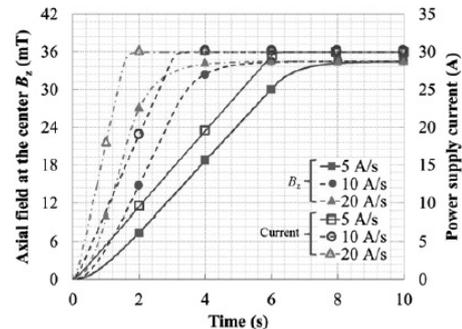


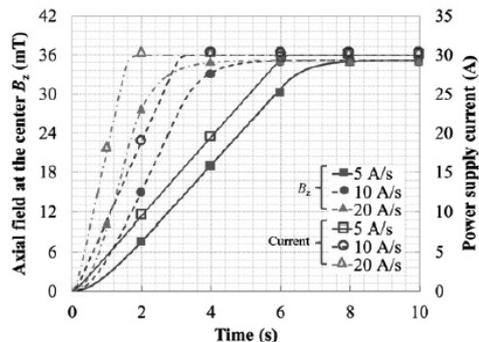
Fig.2 Equivalent circuit model for an NI REBCO coil

Table.1 Parameters of No-Insulation REBCO coils

Parameter	NI20	NI40	NI60
i.d.; o.d. [mm]	60.0; 62.5	60.0; 65.0	60.0; 67.6
Number of Turns	20	40	60
I_c (@77K, self-field) [A]	54	47	43
Inductance [μH]	51.7	198.4	432.3
Characteristic resistance [$\mu\Omega$]	186	360	534



(a) Experiment results



(b) Simulation results

Fig.3 Results of charging current and axial field B_z

Table.2 Experiment and Simulation Results

Ramp rate [A/s]	charging delay time [s]					
	Experiment			Simulation		
	20turns	40turns	60turns	20turns	40turns	60turns
5	0.18	0.90	1.73	0.25	0.84	1.60
10	0.22	1.13	2.10	0.30	1.04	1.96
20	0.24	1.31	2.40	0.35	1.24	2.28

次期定常強磁場施設計画と無冷媒 25T 超伝導マグネット建設について

Planning of the Static High Magnetic Field Facilities in the Next Generation and Constructing of the Cryogenfree 25T Superconducting Magnet

渡辺和雄, 野尻浩之, 佐々木孝彦 (東北大金研)
 清水 禎, 熊倉浩明 (物材機構)
 WATANABE Kazuo, NOJIRI Hiroyuki, SASAKI Takahiko (Tohoku Univ.)
 SHIMIZU Tadashi, Kumakura Hiroaki (NIMS)
 E-mail: kwata@imr.tohoku.ac.jp

磁場は、物性物理学や材料科学などにおける研究に必須の熱力学的パラメータである。物性物理学では、非常に大きな物質の内部磁場から情報を引き出すために強力なパルス磁場が必要である。一方、材料開発では、産業イノベーションに対応する超伝導材料などの開発が急務であるが、それに必要な 50T 級の高品質な定常強磁場が求められている。

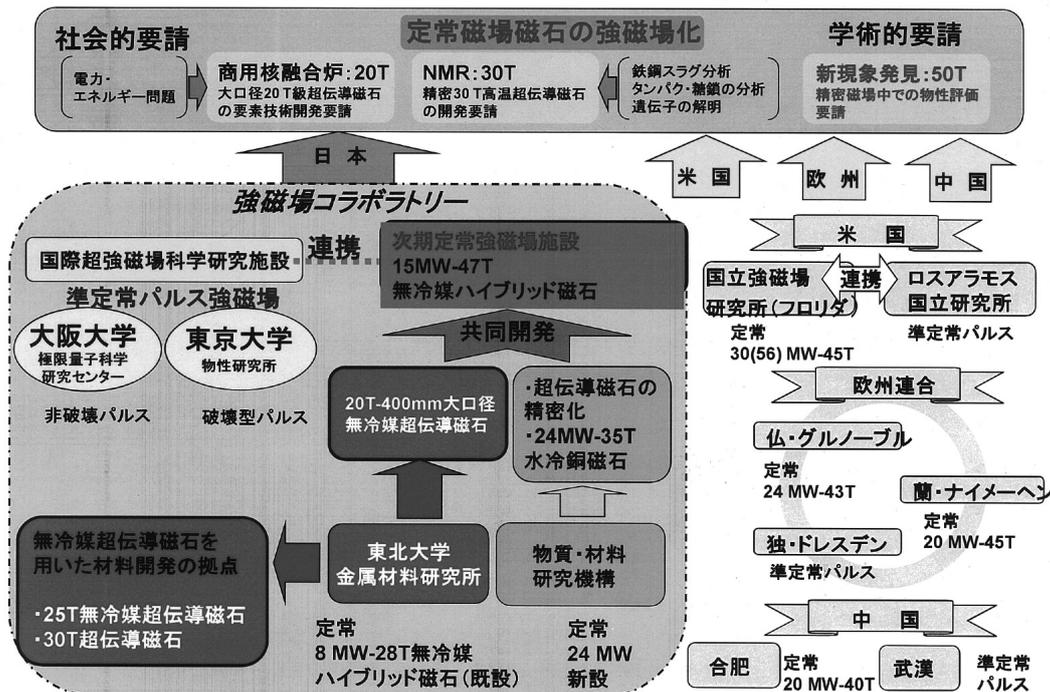
強磁場施設の世界情勢では、米国国立強磁場研究所は、タラハッシーの 45T/56MW 定常磁場とロスアラモスの 100T パルス磁場を統合した施設である。欧州では、フランス (定常 35T(43T)/24MW グルノーブル、パルス 70T ツールーズ)・ドイツ (パルス 90T ドレスデン)・オランダ (定常 33T(45T)/20MW ナイメーヘン) の強磁場施設の更新と併せて EU 全体で運用の統合が行われている。また中国においても武漢で 80T パルス磁場と合肥で 20T(40T)/20MW 定常磁場の 2 拠点で運用されている。

そこで、わが国の強磁場施設である物質・材料研究機構 (定常 35T/15MW)、東北大学金属材料研究所 (定常 30T/8MW)、東京大学物性研究所 (パルス 700T) ならびに大阪大学極限量子科学研究センター (パルス 70T) の機関

は、日本学術会議の提言に基づき、オールジャパン体制で運営する「強磁場コラボラトリー」の計画を進めている。定常磁場に関しては、下図に示すように物材機構と東北大金研が協力して、47T/15MW 無冷媒ハイブリッドマグネット、35T/24MW 水冷銅マグネット、30T 超伝導マグネットならびに 25T 無冷媒超伝導マグネットを開発・設置することとし、共同して効率的な運営を目指す計画である。

現在までのところ、2012 年度補正予算によって東北大学金属材料研究所に無冷媒 25T 超伝導マグネットの整備、及び大阪大学極限量子科学研究センターに室温超伝導探索のための高圧・強磁場複合極限施設として 10MJ コンデンサ電源の整備が認められて建設を行っている。無冷媒 25T 超伝導マグネットは、2014 年度末までに強磁場センター別館が建設されて設置される。また、日本における定常強磁場拠点の建設・運営に向けた連携協定締結が、金属材料研究所強磁場超伝導材料研究センターと物質・材料研究機構・強磁場ステーションで締結され、2013 年度中に、東北大学と物質・材料研究機構間の包括的連携協定が締結される。

日本の強磁場物性研究拠点の形成



無冷媒 25T 超伝導マグネット用 REBCO テープ線材の特性

Mechanical and in-field critical current properties of REBCO coated conductors and electromagnetic force test

大保 雅哉, 藤田 真司, 佐藤 大樹, 飯島 康裕(フジクラ); 淡路 智, 小黒 英俊, 渡辺 和雄(東北大)
 DAIBO Masanori, FUJITA Shinji, SATO Hiroki, IJIMA Yasuhiro (FUJIKURA);
 AWAJI Satoshi, OGURO Hidetoshi, WATANABE Kazuo (Tohoku Univ.)
 E-mail: masanori.daibo@jp.fujikura.com

1. はじめに

REBa₂Cu₃O_y(REBCO, RE; 希土類)テープ線材はその高い臨界電流磁場特性および機械特性から強磁場マグネットへの応用が期待されている。強磁場マグネット設計のためには REBCO テープ線材の低温下での磁場特性の挙動, 機械特性の把握が必要である。前回, 長尺 REBCO テープ線材の磁場中での臨界電流(I_c)角度依存性について報告したが[1], 今回, 液体窒素中自己磁場下(77 K, s.f.)と低温磁場中の I_c 特性の評価結果について報告する。

2. REBCO テープ線材の磁場特性

線材の I_c (77 K, s.f.)と低温磁場中 I_c の挙動を確認するため, 超電導層厚を変えて比較評価を行った。測定に用いた線材の構成は Ag (6~13 μ m) / GdBCO (2.0~5.5 μ m) / CeO₂ (400 nm) / MgO (5 nm) / Y₂O₃ (20 nm) / Al₂O₃ (150 nm) / Hastelloy (75, 100 μ m) である。超電導層(GdBCO)は PLD (pulsed laser deposition)法により成膜した。低温での磁場中 I_c 測定は超電導層をエッチングによりブリッジ加工(400 μ m 幅, 1 cm 長)し, 測定結果は 1 cm 幅換算した。試料は伝導冷却により冷却し, ϕ 200 mm ボアの 3 T マグネット中で 4 端子法により測定した。

Table 1 に示した試料について I_c (77 K, s.f.)と一例として I_c (20 K, 3 T)の測定結果を Fig.1, Fig.2 に示す。Fig.2 は磁場方向は線材の垂直方向磁場(B//c)である。Fig.1, Fig.2 より, I_c (77 K, s.f.)は超電導層厚との相関が非線形近似であるのに対し, I_c (20 K, 3 T)は超電導層厚との相関が線形であることが確認される。また, このことから磁場中の臨界電流密度 J_c は膜厚の増加に対してほとんど低下していないことを示している。

3. I_c (77 K, s.f.)および I_c (77 K, 0.6 T)と低温高磁場中 I_c の相関

上記の結果は液体窒素中自己磁場下と磁場中の I_c の挙動が異なるためと考えられるため, I_c (77 K, s.f.)および I_c (77 K, 0.6 T) と低温高磁場中, 一例として I_c (20 K, 15 T)の相関を比較評価した。Table 1 とは異なる超電導層厚 1.9~3.5 μ m, I_c 498~702 A (77 K, s.f.) のいずれも 100m 以上の長尺線材から 12 試料を用意し, 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で測定した。測定結果および相関係数 R を Fig.3 に示す。Fig.3 より, I_c (77 K, s.f.)と I_c (20 K, 15 T) の相関よりも I_c (77 K, 0.6 T)と I_c (20 K, 15 T)の相関が強いことが確認された。このことから I_c (77 K, s.f.)よりも I_c (77 K, 0.6 T)の方が低温高磁場中の I_c の予測精度が高いことが示唆される。

Table 1 Specifications of samples

Sample	GdBCO thickness (μ m)	I_c (77K, s.f.) (A)	Length (m)
A	2.0	513	350
B	2.4	600	500
C	3.0	658	150
D	3.5	656	50
E	4.1	724	20
F	4.5	692	50
G	5.1	801	50
H	5.5	937	110

4. 参考文献

1. M. Daibo, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 87 (2013) p.152
2. S.Fujita, et al.: presented at European Conference on Applied Superconductivity 2013, (2013) 3P-WT1-06

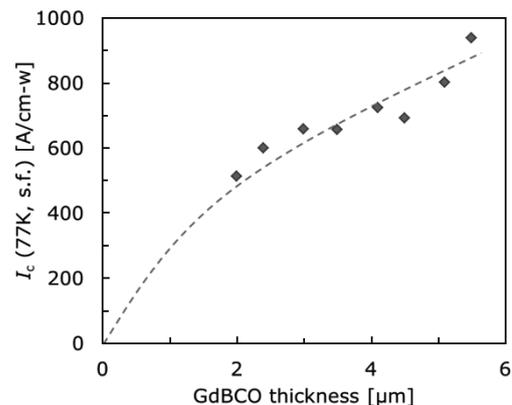


Fig. 1 GdBCO thickness dependence of I_c at 77 K, s.f.

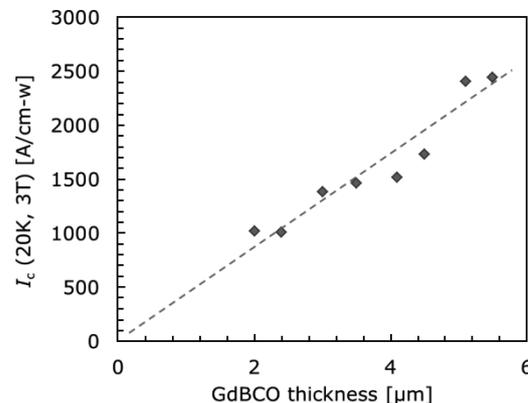


Fig. 2 GdBCO thickness dependence of I_c at 20 K, 3 T

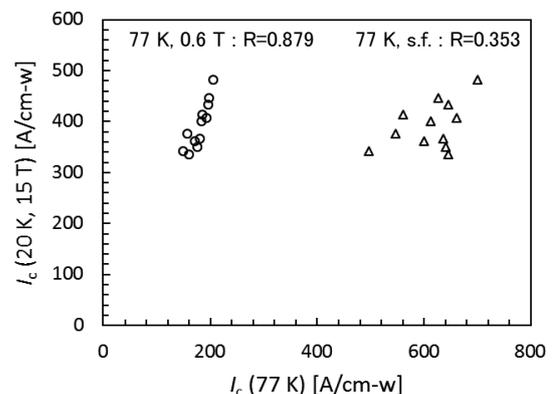


Fig. 3 I_c (20 K, 15 T) as a function of I_c (77 K, s.f.) and I_c (77 K, 0.6 T)

Nb rod 法 CuNb 補強 Nb₃Sn ラザフォードコイルの強磁場中通電試験

Transport properties of Nb-rod-processed CuNb reinforced Nb₃Sn Rutherford coil in high fields

小黒 英俊, 武藤 翔吾, 渡辺 和雄, 淡路 智(東北大); 松本 真治, 二森 茂樹(物材機構);
杉本 昌弘, 坪内 宏和(古河電工); 花井 哲(東芝)

OGURO Hidetoshi, MUTO Shogo, WATANABE Kazuo, AWAJI Satoshi (Tohoku Univ.); MATSUMOTO Shinji,
NIMORI Shigeki (NIMS); SUGIMOTO Masahiro, TSUBOUCHI Hirokazu (Furukawa Electric); HANAI Satoshi (Toshiba)
E-mail: h-oguro@imr.tohoku.ac.jp

1. はじめに

我々のグループでは、次世代強磁場施設のための強磁場超伝導マグネットの開発を行っている。ここで作製が計画されているマグネットとして、25T 無冷媒超伝導マグネット、大口径 20 T 超伝導マグネット、及び、30 T 超伝導マグネットがある。これらのマグネットには、Nb₃Sn ラザフォードケーブルを使用することが計画されている。

前回の講演において、我々が開発してきた高強度 CuNb 補強 Nb₃Sn 線材を用いて作製された、ラザフォードケーブルの強磁場中通電試験の結果を報告した[1]。14 T の I_c が 1823 A であり、このときラザフォードケーブルには 292 MPa の電磁力が加わっていた事が分かった。これは、巨大な応力下でも通電が可能であり、14 T で 1000 A 程度の通電電流に対し、臨界電流は十分な余裕がある事を示している。

今回は、実際に 25T 無冷媒超伝導マグネット(25T-CSM) に使用する、事前曲げ処理を施した Nb rod 法 CuNb 補強 Nb₃Sn ラザフォードケーブルの評価を行った。前回と同様に、強磁場中通電試験を行ったので、その結果を報告する。

2. 実験方法

Nb rod 法 CuNb 補強 Nb₃Sn ラザフォードケーブルを試料として用いた。ラザフォードケーブルは、素線を 16 本束ねて作製しており、これをφ150 mm の熱処理ポビンにて 670°C×96 h の熱処理を行った。熱処理後には、ケーブルのフラットワイズ方向に正方向の事前曲げ処理を、φ65 mm のプーリーに通すことを行った。このときの事前曲げひずみは、素線に 0.7% の事前曲げ処理を与えた際と、等価になる[2]。これを SUS 線とともにφ270 mm の巻き枠に 5 ターン巻き、NIMS の 14T 大口径超伝導マグネットを利用して、14 T、4.2 K にて通電試験を行った。このとき、SUS 線の表面に線材長手方向にひずみゲージを貼ることで、ひずみの計測も行った。この結果より、SUS 線及びラザフォードケーブルに発生した電磁力を見積もる。

3. 実験結果

コイルへの通電は計 7 回行った。この中で、最も大きな電流が流れた 4 回目の通電試験結果を Fig. 1 に示す。電圧が大きく変化しているのは、電磁力によってケーブルが動いたためと考えられる。通電の結果、1452 A でクエンチが発生したため、この実験結果からは I_c を見積もることができなかった。

Fig. 2 には、通電時に SUS 線に発生したひずみの変化を示した。この図より、最大で 0.4% 程度のひずみが発生した事が分かる。このとき、SUS 線が受け持つ電磁力は 590 MPa となり、814 N の荷重を受け持つ事になる。電磁力 ($F = BI$) を見積もると 341 MPa となり、荷重に直すと 2744 N であるため、SUS 線で受け持つ分を差し引くと、ラザフォードケーブルには 1930 N が加わっていることになる。このとき、線材 1 本あたり 120 MPa 程度の応力が加わるが、このときの I_c は 120 A となり、クエンチした際の素線 1 本あたりに流れる電流 91 A に対し、十分に大きい値である。

つまり今回の実験においては、 I_c 近傍まで電流を流すことができなかったことが分かった。その原因は、ラザフォードケーブルの素線が機械的に動いたことによって、クエンチした

めと考えられる。この結果より、実際のマグネットに使用する際には、事前曲げ処理によって超伝導特性を向上させた後に、エポキシ含浸をすることでラザフォードケーブル内の素線の動きを抑える必要があることがわかった。

4. まとめ

25T 無冷媒超伝導マグネット開発のため、高強度 CuNb/Nb₃Sn ラザフォードケーブルの 4.2 K、14 T 中における通電試験を行った。その結果、1452 A までの通電に成功した。1452 A におけるクエンチは、ラザフォードケーブル内の素線の動きが原因と考えられる。実際のマグネットでは、これを抑えるため、エポキシ含浸することを計画している。

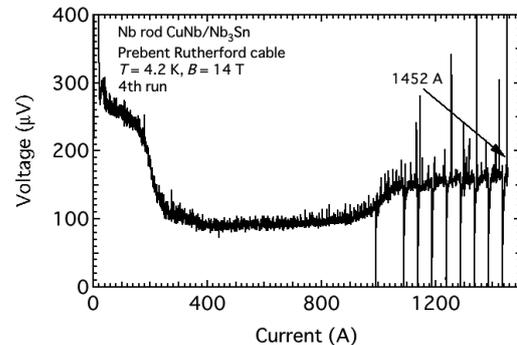


Fig. 1 The transport property of the Nb-rod-processed CuNb/Nb₃Sn Rutherford cable with the prebending treatment at 4.2 K and 14 T. The cable quenched at 1452 A.

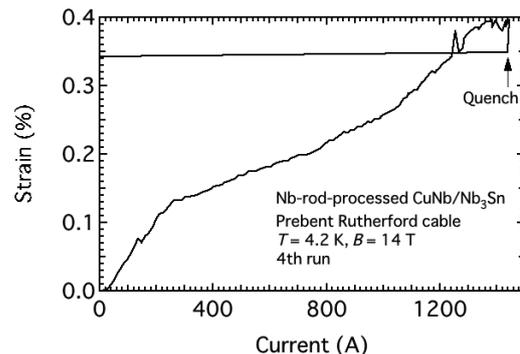


Fig. 2 The strain as a function of the transport current for Nb-rod-processed CuNb/Nb₃Sn Rutherford cable.

謝辞

本研究は科学研究費補助金(基盤 A)及び、JST(A-STEP 本格研究開発ハイリスク挑戦タイプ)による補助を受けました。

参考文献

1. H. Oguro, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 87 (2013) p.151
2. M. Sugimoto, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 87 (2013) p.150

無冷媒 25T 超伝導マグネット用 REBCO インサートコイル

REBCO insert coil for a cryogen-free 25 T superconducting magnet

宮崎 寛史, 岩井 貞憲, 高橋 政彦, 戸坂 泰造, 田崎 賢司, 花井 哲, 井岡 茂(東芝);
淡路 智, 小黒 英俊, 渡辺 和雄(東北大)

MIYAZAKI Hiroshi, IWAI Sadanori, TAKAHASHI Masahiko, TOSAKA Taizo, TASAKI Kenji, HANAI Satoshi,
IOKA Shigeru (TOSHIBA); AWAJI Satoshi, OGURO Hidetoshi, WATANABE Kazuo (Tohoku Univ.)
E-mail: hiroshi17.miyazaki@toshiba.co.jp

1. はじめに

無冷媒 25 T 超伝導マグネットは, REBCO 超伝導線材を用いた内層の高温超伝導コイルが 11 T の磁場を発生し, 外層の LTS コイルが発生する 14 T と組み合わせることで $\phi 52$ mm の室温空間に 25 T の磁場を発生させる. REBCO コイルは熱暴走すると焼損する危険性が高いため, どのような運転および保護動作においても熱暴走させないことが最も重要な設計課題の 1 つである. 本発表では, 熱暴走に関する検討結果を中心にインサートコイル設計について報告する.

2. 諸元

外層の LTS コイルおよび内層の REBCO コイルの諸元を Table 1 および Table 2 に示す. REBCO コイルはシングルパンケーキコイルを 68 枚積層して構成されており, パンケーキコイル間に挿入した高純度アルミと冷凍機を熱的に接続して冷却する. コイルは定常では 10 K 以下まで冷却されるが, 比熱が小さいため, 励消磁時の AC ロスによりコイル温度が上昇してしまう. そこで適切な温度マージンを確保するため, コイル温度が 20 K でも負荷率が 100%を超えないように設計した.

3. 外層コイルクエンチ時の REBCO コイルの電流, 電圧

REBCO コイルが熱暴走しても焼損させない方法として, 線材の銅安定化層を厚くすることが考えられるが, コイルの電流密度が減少してしまい, 必要な磁場を発生できなくなる. そこで, REBCO コイルは, 銅安定化層を 0.04 mm と薄くして電流密度を上げる設計としている. したがって, どのような運転および保護動作においても熱暴走させないことが重要となる. REBCO コイルの運転条件で最も厳しい条件は, 外層の LTS コイルがクエンチした場合であり, LTS コイルがクエンチした場合には, REBCO コイルはすぐに遮断動作に入るが, 磁場の減少を妨げる方向に電流が誘起されるため, REBCO コイルの電流が一時的に増加してしまう. そこで, LTS コイルがクエンチした際の REBCO コイルの電流, 電圧を調べるため, 回路解析を実施した. ここで, LTS コイルにはクエンチヒータを取り付け, 全 LTS コイルが同時にクエンチすることを想定している. また, 各 LTS コイルおよび REBCO コイルには外部抵抗を取り付ける. LTS コイルおよび REBCO コイルの許容電圧を 1 kV とした場合の外部抵抗を Table 3 に示し, 回路解析の結果を Fig.1 に示す. LTS コイルに比べて REBCO コイルのインダクタンスが大きいため, REBCO コイルの減衰が遅く電流が 2 倍近く増加する結果となった. そこで, REBCO コイルの電流増加を抑制するため, 線材を 2 枚束ねて巻線する 2 バンドル構成のコイルについて検討した. 回路解析の結果を Fig.2 に示す. 電流の増加は定格の 1.2 倍程度であり, REBCO コイルの初期温度を 10 K としたときの AC ロスによる温度上昇は最大で 18.2 K となり, 負荷率 100%以下となることを確認した.

4. まとめ

外層の LTS コイルがクエンチして REBCO コイルの電流が増加する最も厳しい条件においても熱暴走させない設計条件を見出した. 今後は 2 バンドル導体とした場合の偏流の影響について検討するとともに詳細設計を進めていく.

Table 1 Specification of LTS coils

	L1	L2	L3	L4a	L4b	L5
Conductor	Nb ₃ Sn			NbTi		
Operating current (A)	851					
Inner radius (mm)	150	186	229	273	301	314
Outer radius (mm)	183	226	270	301	311	356
height (mm)	540	628	628	627	628	628
turns	1440	2046	3205	2740	1235	5853
Maximum field (T)	13.8	11.4	8.4	6.8	6.2	5.8
Field contribution (T)	2.4	2.9	2.7	1.9	0.8	3.2

Table 2 Specification of REBCO insert coil

Tape width (mm)	5
Tape thickness (mm)	0.13
Operating current (A)	135
Inner radius (mm)	48.0
Outer radius (mm)	139.9
height (mm)	393.6
Turns / pancake (turn)	438
Number of pancakes	68
Coil current density (A/mm ²)	111
Maximum hoop stress (MPa)	461

Table 3 External resistances of REBCO and LTS coils

RH	RL1	RL2	RL3	RL4	RL5
3 Ω	0.1 Ω	0.3 Ω	0.35 Ω	0.2 Ω	0.15 Ω

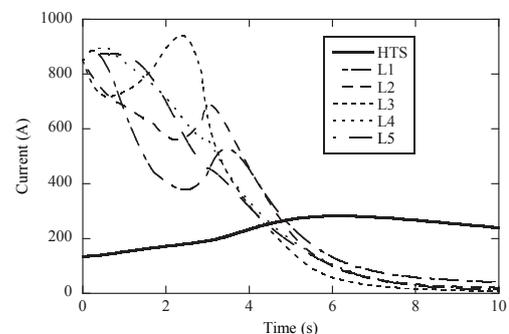


Fig.1 Current variations of LTS coils and REBCO coil wound with single conductor

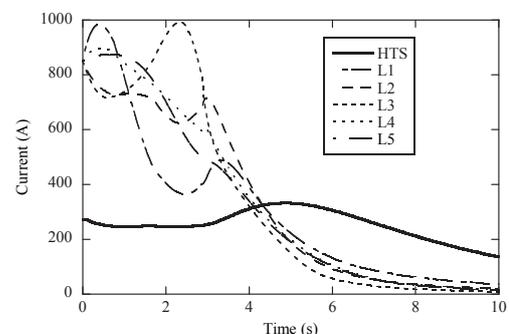


Fig.2 Current variations of LTS coils and REBCO coil wound with 2-strand parallel conductors

謝辞: 本研究の一部は科学研究費補助金(基盤A)による補助を受けています.

無冷媒 25T 超伝導マグネット用冷却系

Cooling system for a cryogen-free 25 T superconducting magnet

高橋 政彦, 宮崎 寛史, 岩井 貞憲, 戸坂 泰造, 田崎 賢司, 花井 哲, 井岡 茂(東芝);
淡路 智, 小黒 英俊, 渡辺 和雄(東北大)

TAKAHASHI Masahiko, MIYAZAKI Hiroshi, IWAI Sadanori, TOSAKA Taizo, TASAKI Kenji, HANAI Satoshi,
IOKA Shigeru (TOSHIBA); AWAJI Satoshi, OGURO Hidetoshi, WATANABE Kazuo (Tohoku Univ.)
E-mail: masahico.takahashi@toshiba.co.jp

1. はじめに

無冷媒 25 T 超伝導マグネット (25T-CSM) は、冷凍機冷却の HTS コイルと LTS コイルを組み合わせることで 25 T の磁場を発生させる。このマグネットでは高磁場で大型の HTS コイルを使うため励消磁時の交流損失が大きい。実用的な 60 分励磁を想定すると 10 W 級の発熱がある。また、冷凍機が磁場の影響を受けないようにコイル中心から離して配置する必要があり、長距離熱輸送が必要となる。本発表では 25T-CSM 用冷却系の基本検討について報告する。

2. 冷却系の構成

検討した 25T-CSM 用冷却系の概念図を Fig.1 に示す。LTS コイルは 4 K 程度に冷却する必要があり、4 K で冷凍能力の大きい GM/JT 冷凍機を用いる。一方で、HTS コイルは発熱が大きいこと、ある程度の高温でも運転できることから、10 K 程度で運転することとし、この温度で冷凍能力の大きい 2 段 GM 冷凍機で冷却する。各冷凍機はコイル中心からは離れた低磁場の場所に配置する。LTS コイルと GM/JT 冷凍機間の伝熱は JT 配管を延長することで対応する。また、HTS コイルと 2 段 GM 冷凍機間の伝熱はガス循環系を用いる。この部分を伝導冷却することも考えられるが、高純度金属の熱伝導率が磁場で低下することと熱負荷が大きいことから伝熱板の必要断面積が大きくなるので選択しなかった。なお、輻射シールドと電流リード 50 K ステージは単段 GM 冷凍機で別途冷却する。各冷却系の熱負荷と運転温度を Table 1 に示す。この熱負荷から冷凍機は各 2 台ずつとした。

3. 初期冷却時間

LTS コイルの初期冷却は冷凍能力の大きい単段 GM 冷凍機を利用することで時間を短縮する。バイパス配管を合わせた 50 K 冷却ステージを単段 GM 冷凍機で冷却し、初期冷却時にはバイパス弁を開けてバイパス配管にガスを流して冷却する。一方 HTS コイルは 2 段 GM 冷凍機のみで初期冷却する。HTS コイルの重量が LTS の 1/15 で、熱容量が少ないためである。各冷却系の初期冷却時間を Table 2 に示す。

4. 最大熱負荷でのコイル温度

熱負荷が最大となる条件として、励消磁を繰り返して定常的にコイル発熱がある場合のコイル温度を検討した。HTS コイルで用いているガス循環系ではガス流量により冷却温度が変わる。ガス流量をパラメータとして冷凍機温度とコイル冷却ステージ温度を計算した結果を Fig.2 に示す。流量が多すぎると熱交換器損失が増えて冷凍機温度が高くなり、流量が少なすぎると冷凍機とコイル冷却ステージ間の温度差が大きくなるため、コイル冷却ステージ温度が高くなる。このためコイル冷却ステージ温度は流量 0.5 g/s 近傍で最も低くなり、8 K 程度になる。これに伝熱板やコイル内部の温度差を加えてもコイル温度は 12 K 以下に冷却できる見通しが得られた。

5. まとめ

25T-CSM 用冷却系の基本検討をし、LTS コイルを GM/JT 冷凍機で、HTS コイルを 2 段 GM 冷凍機+ガス循環系で冷却す

る構成を検討した。初期冷却時間は 12 日であった。また、最大熱負荷での HTS コイル温度は 12 K 以下に冷却できる見通しが得られた。

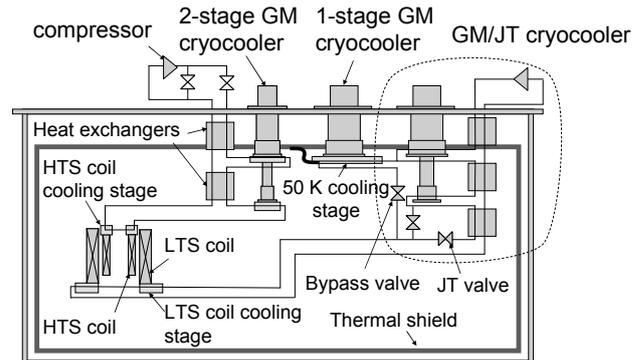


Fig.1 Schematic figure of a cooling system for a cryogen-free 25 T superconducting magnet

Table 1 Specification of a cooling system

	Heat load	Operating temperature	Cryocoolers
HTS Coil	10.3 W	10 K	Two 2-stage GM cryocoolers
LTS Coil	4.4 W	4.3 K	Two GM/JT cryocoolers
Thermal Shield	154 W	50 K	Two 1-stage GM cryocoolers

Table 2 Calculated cool down time

	Cold mass	Cool down time
HTS Coil	130 kg	4 days
LTS Coil	1900 kg	12 days
Thermal Shield	380 kg	8 days

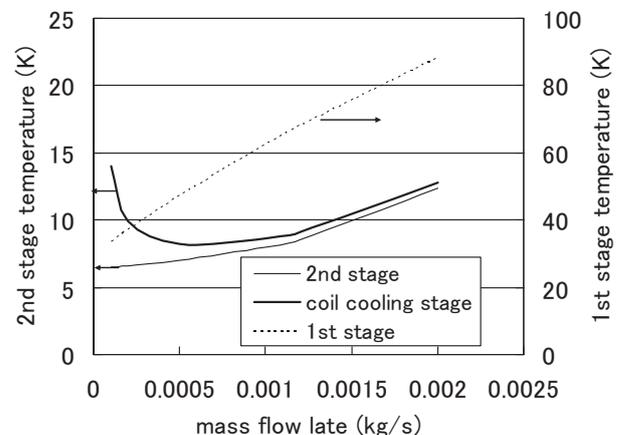


Fig.2 Calculated Temperature of GM cryocooler and HTS coil

謝辞: 本研究の一部は科学研究費補助金(基盤A)による補助を受けています。

無冷媒 25T 超伝導マグネット用高温超伝導コイルにおける交流損失検討

The ac-losses of HTS coil in 25T cryogen-free superconducting magnet

淡路 智, 渡辺和雄, 小黒英俊, 水戸瀬智久(東北大金研); 柁川 一弘(九大); 藤田 真司, 大保 雅哉, 飯島 康裕(フジクラ); 宮崎寛史, 高橋政彦, 井岡 茂(東芝)

AWAJI Satoshi, WATANABE Kazuo, OGURO Hidetoshi (Tohoku Univ.); KAJIKAWA Kazuhiro (Kyushu Univ.); FUJITA Shinji, DAIBO Masanori, IJIMA Yasuhiro (Fujikura); MIYAZAKI Hiroshi, TAKAHASHI Masahiko, IOKA Shigeru (Toshiba)
E-mail: awaji@imr.tohoku.ac.jp

1. はじめに

東北大学金研・強磁場超伝導材料研究センターでは、25T 無冷媒超伝導マグネット建設が進んでいる。このマグネットは、NbTi 及び Nb₃Sn を用いた金属系超伝導コイル(LTS コイル)と、GdBa₂Cu₃O_y (Gd123) コート線材を用いた HTS コイルから構成され、LTS で 14T, HTS で 11.5T により中心磁場 25.5T を 52mm の室温空間に発生する設計となっている [1]。これらのマグネットは、2 台の GM 冷凍機により HTS コイルを、2 台の GM/JT 冷凍機により LTS コイルを冷却する。この際、冷凍機の冷凍能力には限界があるので、コイル熱設計が重要となる。特に、励消磁の際に生じる交流損失の影響は、システムの冷却系を考える上で、非常に重要となる。HTS コイルは、 J_c の高いテープ線材を用いるため、そのヒステリシス損失は無視できず、テープの積層効果も加味した詳細な検討が必要となる。本報告では、Gd123 テープ線材の J_c 特性に基づいた交流損失検討結果について報告する。

2. 実験と計算方法

交流損失を計算するため Gd123 テープ線材の、4.2K における磁化測定、及び輸送法による J_c 測定を実施した。交流損失は磁化の結果から直接計算した結果と、輸送法による J_c 測定結果からコイル内部磁場分布を考慮して無限平板近似を用いて計算結果を比較した。

2-1. 磁化特性からの算出

Gd123 テープをエッチングにより $\phi 2 \mu\text{m}$ に加工し、2枚重ねて 4.2K に於いて 18T までの磁化測定を実施した。この結果を 5mm 幅テープの磁化に換算し、交流損失の垂直磁界損失を見積もった。25TCSM 内での垂直磁界成分は最大で約 2.4 T であり、定格までの掃引時間を 1 時間として、交流損失計算は 2.4 T/h の掃引を仮定して計算した。コイル内部の磁界は場所によって異なるため、コイルの半分がこの交流損失を発生すると仮定した。

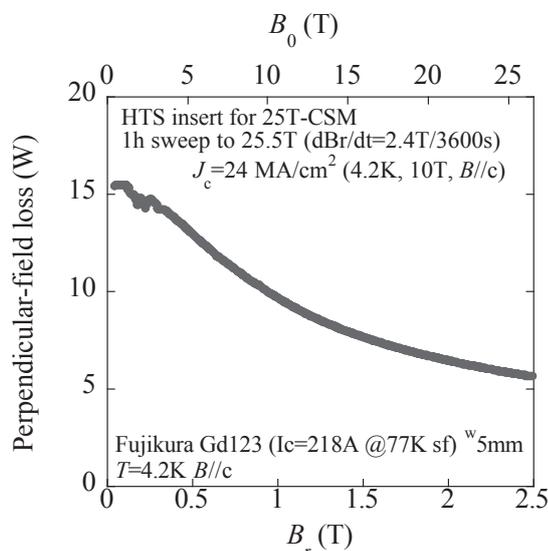


Fig.1 Perpendicular-field loss estimated from the magnetization at 4.2K for $B//c$.

2-2. 無限平板モデルによる算出

無限平板モデルでは、Gd123 テープ(超伝導層 $2 \mu\text{m}$, 幅 5mm)の 4.2K における J_c の角度依存性と磁場依存性を用いて、コイル内部の磁場分布から各ターンの J_c を計算した。得られた J_c と、磁場のテープ垂直成分を用いて、各ターンの垂直磁界損失を計算し、コイル全体分を合算することで、コイル全体の垂直磁界損失を計算した。コイルの磁場掃引は、HTS・LTS コイル同時掃引と仮定し、掃引時間は 25T まで 1 時間と設定した。交流損失計算では、パンケーキを無限平板と仮定して、無限平板の幅をテープ幅の 5mm に設定した[2]。

3. 結果

図1に、磁化から求めた交流損失の磁場依存性を示す。計算は磁化のメジャーループから計算したため、中心到達磁界以下の効果は考慮されていない。 J_c の磁場依存性により、磁場の増大とともに交流損失が減少している。また、損失の最大値はゼロ磁場近傍で約 15W となっている。図2は、無限平板モデルによって輸送 J_c の角度依存性も考慮して計算した結果である。計算に用いた J_c 値が異なっているので絶対値に関して単純な比較はできないが、図2の結果は、図1とは大きく異なり、磁場増加に伴って損失が増大している。これは、中心到達磁界が、印加磁界を上回っているためである。テープ線材単体の交流損失は、中心到達磁界が低いため、測定される損失は磁化曲線のメジャーループが反映される。しかし、実際のコイルではテープ線をコイル状に巻いたパンケーキ形状をしているため、積層の効果により無限平板近似に近くなる。このため中心到達磁界が発生磁場よりも大きくなり、交流損失が低減する。25TCSM では、テープで求めた交流損失の約半分以下となると予想される。

参考文献

1. S. Awaji, et al.: IEEE TAS, (2014) in press.
2. K. Kajikawa, et al.: Physica C, vol. 469 (2009) p. 1436.

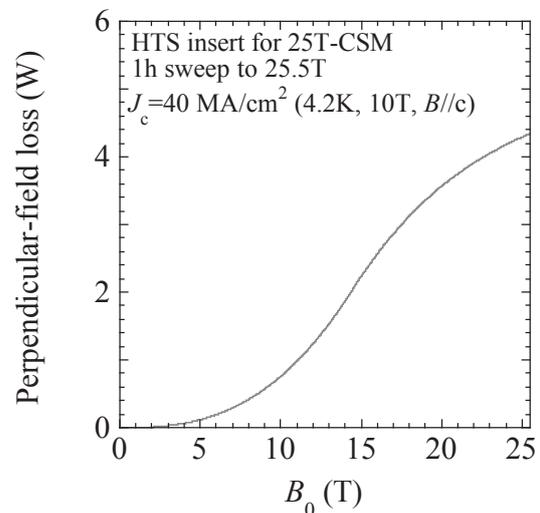


Fig.2 Perpendicular-field loss estimated from transport J_c (B, θ) at 4.2 K by slab model.

400 MHz (9.4 T) LTS/REBCO NMR 磁石における遮蔽電流磁場のヒステリシス

Screening current-induced magnetic field and shielding effect of SC shim coil field for an LTS/REBCO NMR magnet operated at 400 MHz

朴 任中, 中込 秀樹(千葉大); 濱田 衛(JASTEC); 松本 真治(NIMS); 末松 浩人(JEOL RESONANCE);
柳澤 吉紀, 金 新哲, 高橋 雅人, 前田 秀明(理研)
PIAO Renzhong, NAKAGOME Hideki (Chiba University);
HAMADA Mamoru (JASTEC), MATSUMOTO Shinji (NIMS); SUEMATSU Hiroto (JEOL RESONANCE);
YANAGISAWA Yoshinori, JIN Xinzhe, TAKAHASHI Masato, MAEDA Hideaki (RIKEN)
E-mail: piao@chiba-u.jp

1. はじめに

我々は REBCO 内層コイルを用いた高磁場・コンパクト NMR システムの開発を進めている。プロジェクトの中間ステップとして開発した LTS/REBCO NMR 磁石において、REBCO を使用した磁石としては世界初となる多次元 NMR 測定を 400 MHz (9.4 T) の運転磁場で成功したことを春の学会で報告した[1]。しかし、REBCO コイルは遮蔽電流が磁場の安定性と均一性へ与える影響が顕著であるため、今後の開発に向けて、この問題の定量化と対策技術の確立が重要である。本研究では LTS/REBCO NMR 磁石における遮蔽電流磁場のヒステリシス効果と、遮蔽電流が超伝導シムコイルの磁場補正に及ぼす影響について定量化を行い、過去に実施した LTS/Bi2223 NMR 磁石[2]の結果と比較した。

2. 実験方法

LTS/REBCO NMR 磁石は 5 mm 幅のフジクラ製 REBCO 線材で巻いた内層コイルと外層 LTS コイルを直接接続した系で構成され、4.2 K で運転する。REBCO 内層コイルは過去に開発した LTS/Bi2223 NMR 磁石の Bi2223 内層コイルとほぼ同寸法である。LTS/REBCO NMR 磁石は 137 A において 11.7 T (LTS: 9.42 T + REBCO: 2.32 T, 500 MHz に対応) の磁場を発生する。この磁石を 0.01 A/s の掃引速度で 144 A まで励磁し、同じ掃引速度で 0 A まで消磁をした。その後、磁石を冷却したまま REBCO 内層コイルのみを、0A → -137A → 0A → 137A → 0A → -137A → 0A → 137A → 0A の手順で励消磁した。遮蔽電流磁場は、テスラメータまたはホール素子で測定した磁場から、中心磁場の設計値を差し引くことで求めた。

3. 実験結果

LTS/REBCO NMR 磁石の励消磁過程における遮蔽電流磁場のヒステリシスを Fig.1 に実線で示す(矢印 1~3 参照)。遮蔽電流磁場は励消磁過程において 60 A 付近で -116 mT で飽和を示す。144 A において遮蔽電流磁場は -100 mT であり、これは磁石中心磁場 12.32 T に対して、-0.82% の大きさである。Fig.1(b) に示すように LTS/Bi2223 NMR においては、137 A のときの遮蔽電流磁場は -12 mT である。これは磁石の中心磁場に対して -0.10% の大きさであり、LTS/REBCO 磁石の 137 A における遮蔽電流磁場と比べるとわずかに 12% の大きさである。

Fig.1(a) に REBCO 内層コイル単体の励消磁における遮蔽電流磁場のヒステリシスを破線で示す(矢印 4~9 参照)。ヒステリシスループは 137 A では飽和を示さない。これは外層 LTS コイルのバックアップ磁場がなくなり、REBCO 線材の J_c が高くなったためである。一方 Fig.1(b) に示すように Bi2223 内層コイルは自己磁場のみでも 78~137 A の領域において遮蔽電流磁場が飽和を示している。REBCO 線材では幅広の超伝導層に自由に遮蔽電流が誘導されるのに対し、多芯構造の Bi2223 線材では、内部でブリッジしたフィラメントにおける限定的なパスにのみ遮蔽電流が誘導されるため、このような顕著な差が生じるのである。

4. 議論

上述のように、ほぼ同寸法の HTS 内層コイルを持つ LTS/REBCO NMR 磁石と LTS/Bi2223 磁石では、500 MHz の運転磁場において、遮蔽電流磁場の大きさに 10 倍近くの差がある。これは磁場のドリフトや、シムコイルや補正コイルの磁場が遮蔽される効果が、REBCO を使用したほうが 1 桁大き

くなることを意味する。実際、LTS/Bi2223 NMR 磁石では顕在化しなかった補正コイル磁場の顕著な遮蔽効果や超伝導シムコイル磁場に対する影響が LTS/REBCO NMR 磁石では見られた[1]。NMR 磁石に必要な精密磁場発生観点からのみ考えれば Bi2223 コイルのほうが適している。REBCO コイルの優位性である高強度性、高電流密度性を NMR 磁石において活かすには、遮蔽電流の影響を克服するために、(i) 幅の狭い線材の使用、(ii) スクライピング線材[3]の使用、(iii) 遮蔽電流の影響下で磁場を補正する技術(すなわち補正コイル・超伝導シム・室温シム・磁性シムのベストミックス技術)などの構築が必要である。これらについて、それぞれ開発を進めている。

5. まとめ

LTS/REBCO NMR 磁石では Bi2223 コイルを使用した場合と比べて遮蔽電流の影響が 1 桁大きい。REBCO 線材の強みを NMR 磁石に活かすには(i) 幅の狭い線材、(ii) スクライピング線材、(iii) 磁場補正のベストミックス技術の開発が必要である。

本研究の一部は JST S イノベにより、一部は JST 先端計測によって行われたものである。

参考文献

- 柳澤他、2013 年度春季低温工学・超伝導学会、1A-a03
- Yanagisawa et al, J. Magn. Reson. 203, 274-282, 2010
- 許他、2013 年度秋季低温工学・超伝導学会、2P-p21

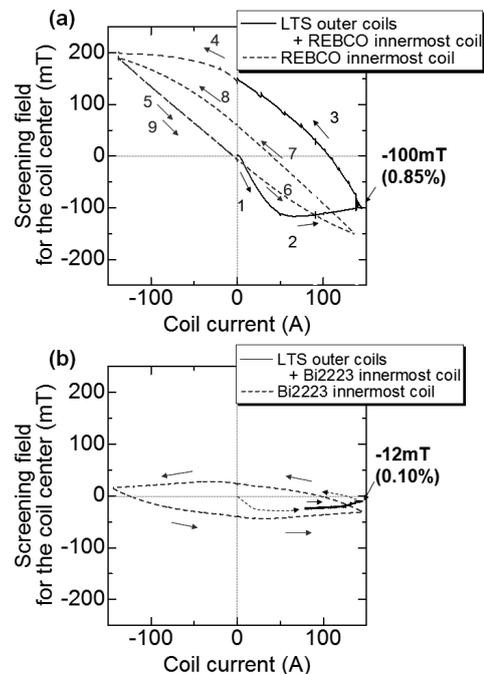


Fig. 1. Hysteresis loops of screening current induced magnetic field as a function of coil current for (a) the LTS/REBCO magnet and the REBCO innermost coil, and for (b) the LTS/Bi2223 magnet and the Bi2223 innermost coil.

遮蔽電流の影響下で効果的に機能するラジアル超伝導シムコイルの開発 ～遮蔽電流によるシムコイル磁場のヒステリシス効果～

An effective radial superconducting shim coil under screening current
-Hysteresis effect of shim coil field due to screening current-

井口 聖威也(上智大);柳澤 吉紀(理研);濱田 衛(JASTEC);高尾 智明(上智大);朴 任中, 中込 秀樹(千葉大);
松本 真治(NIMS);末松 浩人(JEOL RESONANCE);金 新哲, 高橋 雅人, 前田 秀明(理研)

IGUCHI Seiya (Sophia Univ.); YANAGISAWA Yoshinori (RIKEN); HAMADA Mamoru (JASTEC); TAKAO Tomoaki (Sophia Univ.);
PIAO Renzhong, NAKAGOME Hideki (Chiba Univ.); MATSUMOTO Shinji (NIMS); SUEMATSU Hiroto (JEOL RESONANCE);
JIN Xinzhe, TAKAHASHI Masato, MAEDA Hideaki (RIKEN)
E-mail: seiya.iguchi@riken.jp

1. はじめに

我々は JST S イノベにおいて REBCO 内層コイルを用いた高磁場・コンパクト NMR システム (LTS/REBCO NMR) の開発を進めている。この種の磁石では外層側に設置された超伝導シムコイルの磁場が、REBCO 内層コイルに誘導される遮蔽電流によって影響を顕著に受けることで所望の磁場調整が困難になり、NMR に必要とされる均一磁場の実現が難しい [1]。この観点から遮蔽電流の影響を受けにくいラジアル超伝導シムコイルの検討を進めている。しかしながら、現状では遮蔽電流の影響下におけるシムコイルの基本的な振る舞いのメカニズムは明らかでなく、現象をロジカルに説明できる段階にない。本研究では、ラジアル超伝導シムコイルを模擬した銅シムコイルを LTS/REBCO NMR 磁石に使用した内層 REBCO コイルの外周に設置して液体窒素中で試験を行うことで、遮蔽電流の影響下におけるシムコイル磁場のヒステリシス効果と磁場記憶効果について初めて明らかにした。

2. 実験方法

REBCO コイルの寸法は内径 81 mm、外径 118 mm、長さ 400 mm で、総線材長は 1.7 km、総ターン数は 5573 である。線材は幅 5 mm、厚み 0.15 mm のフジクラ製のものである。ロードラインから見積もられる 77 K でのコイル臨界電流は 71 A である。X 成分の磁場勾配を発生させるラジアル超伝導シムコイルを模擬した銅コイルを製作し、REBCO コイルの外周に装着した。このシムコイルは 1 A あたり 4.6 kHz/cm の X 成分磁場勾配を発生させるものである。REBCO コイルを液体窒素で冷却して通電電流を変化させながら、X シムコイルに -12 ~ 12 A の電流を流し、ホール素子を REBCO コイル中心付近において螺旋状に回転させながら磁場分布を測定した。REBCO コイル中心から軸方向に ±0.5 cm、径方向に半径 1 cm の空間について、1 回転当たり 0.2 cm ずつ軸方向に移動させながら測定した。得られた磁場分布をルジャンドル関数展開し、磁場勾配成分を求めた。

3. 実験結果と議論

REBCO コイル電流 I_{RE} が 0 A の場合の、X シムコイルの発生させる X 磁場成分とシムコイル電流 I_x の関係を Fig.1(a) に示す。X 磁場成分はヒステリシスを示しており、ヒステリシスループ全体の振幅が 2.7 kHz/cm なのに対し、 $I_x = 0$ A における振幅 (すなわち残留磁場) が 0.9 kHz/cm 存在している。また、1 A あたりの X 磁場成分の補正能力は 0.11 kHz/cm であり、これは破線で示す室温における補正能力のわずか 2.5% である。すなわち遮蔽電流の影響で、ヒステリシス効果を示すとともに、補正能力が 97.5% も損なわれているのである。 I_{RE} を大きくしていくと、補正能力は増加するが、一方で残留磁場振幅も増加してゆく。Fig.1(c) に示すように $I_{RE} = 20$ A の場合、ヒステリシスループの振幅 4.9 kHz/cm に対し、残留磁場振幅が 2.9 kHz/cm にもなる。これは、超伝導シム調整において、一度流したシム電流を下げても、発生させた磁場成分の約 6 割が残ることを意味する。実際の NMR 磁石における超伝導シム調整では、磁場分布測定と各成分のシムコイル電流の調整を繰り返しながら、磁場の不均一性を減らしてゆく。今回見出されたシムコイル磁場のヒステリシスはこの種の調整を阻害するものである。

Fig.2 に REBCO コイルの磁場と、X シムコイルの発生させる磁場勾配の相互作用を示す。REBCO コイルに 10 A 通電した状態で、X シムコイルを 12 A にまで励磁/消磁した後、磁場分布を測定した (Fig.2(a) 参照)。その後、REBCO コイルを消磁した後、再度磁場分布を測定した (Fig.2(b) 参照)。Fig.2 に見られる正弦波状の分布が X 磁場成分であり、(a)、(b) における

X 磁場成分はそれぞれ 1.46 kHz/cm、1.49 kHz/cm であり、変化はみられない。すなわち REBCO コイルの消磁前後において、遮蔽電流がつくる X 磁場成分がそのまま記憶されている。これは各磁場成分に対応する遮蔽電流パスが REBCO コイル内部に存在し、それらが独立に振る舞うことを意味している。この性質を利用すれば、シムコイルのヒステリシス効果を通電手順の工夫によって、成分ごとに無効化することができる可能性がある。

4. まとめ

REBCO コイルに誘導される遮蔽電流によってシムコイルの磁場が顕著なヒステリシス効果を示すことを初めて明らかにした。これは REBCO コイルを使用した NMR 磁石における超伝導シム調整を阻害するものであり、対策が必要である。

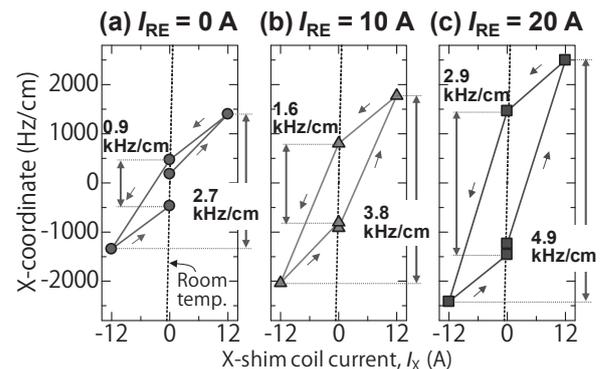


Fig.1 Hysteresis of the magnetic field generated by the X-shim coil for (a) $I_{RE} = 0$ A, (b) $I_{RE} = 10$ A, and (c) $I_{RE} = 20$ A. The dashed line in each graph is X-shim coil field at room temperature.

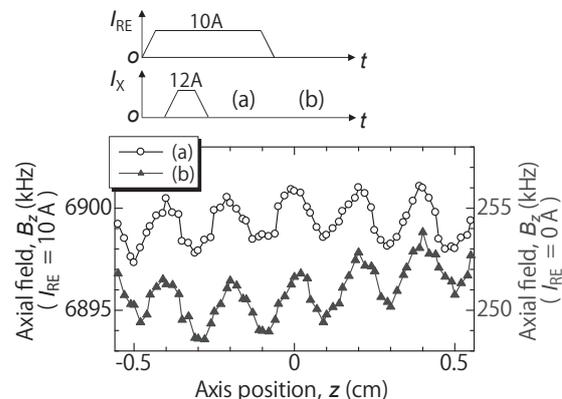


Fig.2 Memory effect of magnetic field distribution.

5. 謝辞

本研究は科学技術振興機構の「戦略的イノベーション創出推進プログラム (S-イノベ)」の支援によって行われた。

参考文献

[1] 朴他, 2013 年度秋季低温工学・超伝導学会, 1A-p07

REBCO コイルの遮へい電流磁場の低減に関する検討

Investigation on Reduction of Magnetic Field generated by Screening Current in REBCO Coil

植田 浩史(阪大); 齋藤 隼, 有谷 友汰, 梅田 大貴, 道辻 健太, 狩野 開, 王 韜, 王 旭東, 石山 敦士(早大);
福田 光宏, 畑中 吉治(阪大); 野口 聡(北大)

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

FUKUDA Mitsuhiro, HATANAKA Kichiji (Osaka Univ.); NOGUUCHI So (Hokkaido Univ.);

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

1. はじめに

近年、高温超電導技術を活用した 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。我々は、これまでに遮へい電流磁場分布を評価する電磁場解析手法を開発し、実験結果と解析結果の比較を行ってきた⁽¹⁾⁽²⁾。今回は、RE 系超電導コイルの遮へい電流によって発生する磁場への巻線法や細線化の影響を電磁場解析により評価した。

2. 細線化

低温超電導線材においてはマルチフィラメント線にツイストを施すことで、遮へい電流を抑制するのが一般的である。しかし、高温超電導線材はテープ形状をしているため、低温超電導線材のようなツイストはできない。現在、テープ線において、マルチフィラメントやツイストと同等の効果が期待できる工夫として、細線化、積層導体のツイスト⁽³⁾、Roebel 導体⁽⁴⁾などが提案されている。本研究では、Table 1 の諸元のパンケーキコイルを想定して、10 mm 幅の線をそのまま用いたもの、10 mm 幅の線を 5 分割したもの(細線幅 2 mm)で巻いたものに対して、筆者らが開発した電磁場解析手法⁽⁵⁾を用いて、遮へい電流磁場を評価した。本解析では、RE 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、線材厚み方向について電磁場が一樣であると仮定する近似を用いた。

3. 解析結果

Fig. 1 に電流分布を示す。これによると、遮へい電流は 3 段重ねたダブルパンケーキコイルの内、上下端のコイルに多く流れており、中央のコイルにはほとんど流れていない。テープ面に垂直な磁場がコイル両端で大きくなるためであるが、この結果は遮へい電流の抑制対策を磁場分布に応じて施すことが有効となる可能性を示唆している。

細線化された線材では、細線化された線それぞれに遮へい電流が流れる。Fig. 2 に通電電流とコイル中心の遮へい電流磁場の関係を示す。細線化することによって遮へい電流磁場が抑制されていることがわかる。特に、通電電流が上がると(負荷率が増えると)、遮へい電流磁場の減少が顕著になる。通電電流に遮へい電流が重畳された電流が高温超電導線材の I - V 特性に従うことになるため、細線化することによって、細線一本あたりに流れる遮へい電流が抑制されるためと考えられる。

なお、本研究の一部は科研費(若手研究B:No. 23760260 および基盤研究C:25420253)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. 87 (2013) p.11.
2. Y. Ariya, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 88 (2013) .
3. M. Takayasu et al., "Conductor Characterization of YBCO Twisted Stacked-Tape Cables", presented at ASC 2012
4. W. Goldacker, et al.: "High current DyBCO-ROEBEL Assembled Coated Conductor (RACC)," Journal of Physics, Conference Series 46 (2006) p. 901.

Table 1 Specifications of HTS double pancake (DP) coil

	Design
Inner diameter	100 mm
Outer diameter	120 mm
Height	23.0 mm
Number of turns per DP coil	50×2
Number of DP coils	3
Width of tape	10.0 mm
Thickness of REBCO layer	1.0 μ m
Thickness of tape	0.2 mm

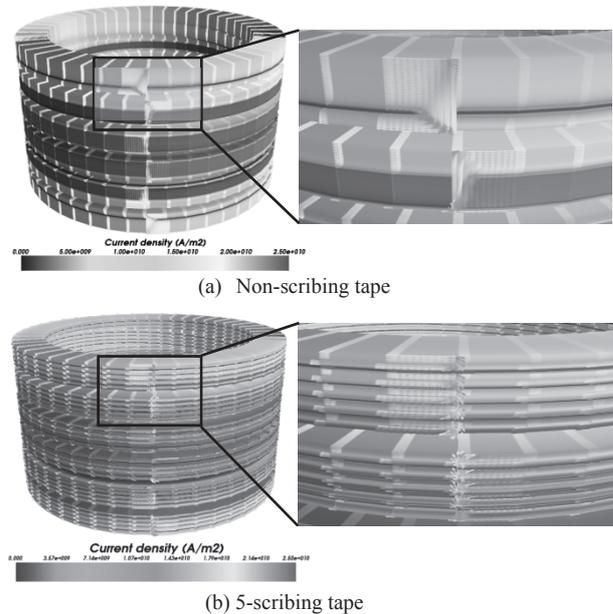


Fig. 1. Numerical results of current distributions in winding tape.

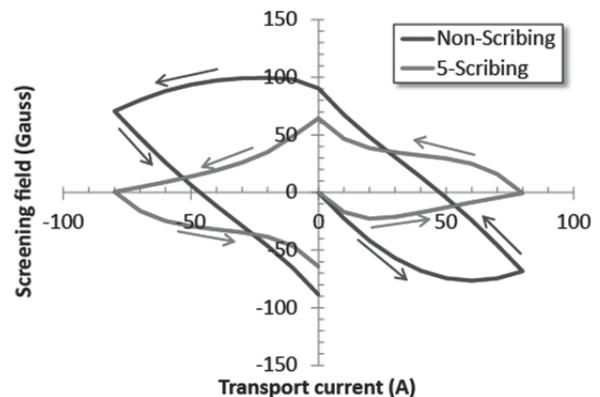


Fig. 2 Numerical results of magnetic field generated by screening current.

5. H. Ueda, et al.: "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.

線材長手方向の非対称臨界電流分布を考慮した 高温超電導パンケーキコイルの通電特性

Current transport characteristics of HTS pancake coil taking account of
asymmetrical critical current distribution along longitudinal direction

越智 貴章, 中村 武恒, 雨宮 尚之 (京大)

OCHI Takaaki, NAKAMURA Taketsune, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto Univ.)

E-mail: t-ochi@asl.kuee.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

我々は、RE系高温超電導マグネット開発にむけた基盤研究を展開している。これまで、テープ材長手方向の臨界電流特性の統計的バラツキ(Gauss分布)とコイル通電特性の関係を検討してきた[1]。

本講演では、上記統計的バラツキをさらに詳細に検討し、一見 Gauss 分布に従うと考えられていた臨界電流分布が、より一般性の高い Weibull 分布に従うことを明らかにした。さらに、簡単なパンケーキコイルを対象とした直流通電特性解析を実施し、上記 Weibull 関数の非対称性が、特に最大局所電界に大きな影響を与えることが分かったので報告する。

2. 臨界電流分布ならびに解析方法

本研究では、(株)フジクラ製造のRE系高温超電導テープ材(幅: 5 mm、平均臨界電流: 222 A@77 K)を検討対象とした。まず、Tapestar[®]によって測定されたテープ材長手方向の局所的臨界電流分布を用い、その度数分布を1 A毎に求めるとともに、Weibull分布関数およびGauss分布関数によってフィッティングした。Fig. 1には上記検討結果を示すが、Gauss分布に比べ、Weibull分布関数は本試料の臨界電流分布をより精密に表現できている。

また本報告では、簡単なダブルパンケーキコイルを対象として、上記長手方向臨界電流の統計的バラツキとコイル通電特性の関係を解析した。Fig. 2には、解析対象としたコイルの概略図(一層15ターンのダブルパンケーキコイル、内径: 50 mm、外径: 65 mm、中心磁束密度: 0.107 T@150 A)を示す。解析に際しては、予め有限要素法によって上記コイルの各要素における磁界ベクトルを求め、通電特性決定のための条件パラメータとする。通電特性の評価には、木須らが提案しているパーコレーション遷移モデル[2]を適用した。軸対称モデルを考え、1ターン(同一の自己磁界を経験)を周方向に0.5 mm間隔で要素分割するとともに、各要素の臨界電流特性にWeibull分布若しくはGauss分布に基づいて乱数を与え、強制通電したときの電界を統計学的に計算した。そして、同様の計算を全てのターンについて実施し、コイル全体の通電特性評価を実施した。

3. 結果と考察

Fig. 3 には、コイル内最大電界—通電電流の解析結果を示す。同図中の“Mean value”の特性カーブは、臨界電流をTapestar[®]によって測定された局所的臨界電流の期待値で固定し、長手方向バラツキを考慮しない場合の結果である。同図から明らかのように、バラツキを考慮したときの最大局所電界は“Mean value”特性に比べて大きく、同傾向は通電電流が小さくなるほど顕著となる。さらに、Weibull 分布でバラツキを与えた場合の最大局所電界に着目すると、Gauss 分布の結果に比較してさらに2倍近く大きくなる。即ち、Fig. 1の結果をみると、一見そのフィッティングに関して Weibull 分布でも Gauss 分布でも大差無いように見えるが、特に最大局所電界に注意すべき具体的な形状を検討する際、非対称 Weibull 分布を導入すべきであると考えられる。

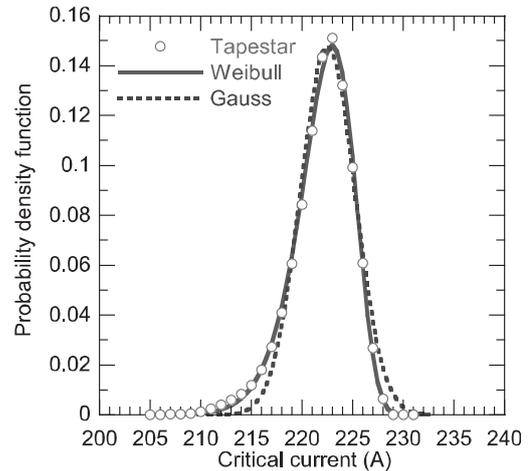


Fig. 1 Probability density function of local critical current, obtained from Tapestar[®], in RE-system HTS tape

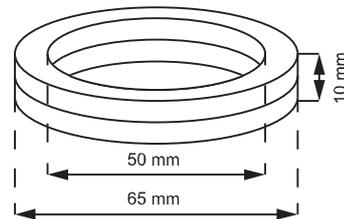


Fig. 2 Schematic diagram of analysis model

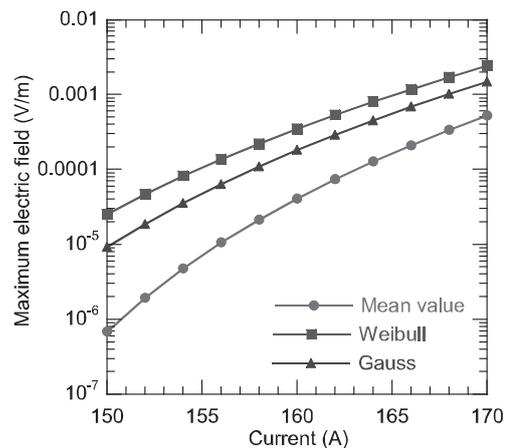


Fig. 3 Analysis results of maximum electric field

参考文献

1. 中村武恒 他, 低温工学, Vol. 48, No. 4 (2013) pp. 178-186
2. 木須隆暢 他, 低温工学, Vol. 34, No. 7 (1999) pp. 322-331