

REBCO コイル化技術の新しい視点

The new perspective of REBCO coil technology

前田 秀明, 柳澤 吉紀(理研)

MAEDA Hideaki, YANAGISAWA Yoshinori (RIKEN)

E-mail: maeda@jota.gsc.riken.jp

1. はじめに

REBCO コイル化技術については、①機械的な要因によるコイル特性劣化、②高電流密度での熱暴走に対するコイル保護、③電磁誘導などの電磁現象(遮蔽電流磁場他)という技術課題に基づき、体系化が進みつつある。最近では実規模コイルのデータが取得できるようになり、新しい現象や技術課題が報告され始めた(1B-a01)。

本報では REBCO コイル化技術の新しい視点として、「パンケーキ方式とレイヤー巻き方式では取り扱う技術課題が全く異なる」ことを提示したい。本報でその全体を概括し、次の 3 報(2A-a02 から 2A-a04)で保護と電磁誘導現象に関するトピックスを詳述する。劣化や遮蔽電流に関しては、1B-a01 から 1B-a05 の発表を参照いただきたい。なお、本研究の一部は、JST S-イノベによって行われた。

2. レイヤー巻きコイルとパンケーキ巻きコイル

2.1 機械的な要因による特性劣化

レイヤー巻き:レイヤー巻きコイルでは、軸方向の電磁力で線材が動き線材の座屈を生み易い(1B-a04 松田他、1B-a05 梶田他)。LTS コイルでは、線材の動きはクエンチを生むので、損傷には至らないことが多いが、REBCO コイルはクエンチしにくいので、マクロな動きが生じて損傷に至る。電磁力による線材の動きを防ぐには、エポキシ含浸が有効であるが、①冷却時の熱応力によるコイル特性の劣化、②レイヤー巻きコイルへのエポキシの浸透の悪さなどの課題がある。この点から、塗りこみ含浸などが有効である(1B-a04 松田他)。非含浸法やパラフィン含浸法を用いて、軸方向の線材の動きを有効に抑制するのは容易ではない。LTS コイルでクエンチ研究に利用された、巻き線・冷却・励磁による面圧解析などが有効である。

パンケーキ巻きコイル:一般にパンケーキコイル間は仕切り板で分離されているので、電磁力による軸方向へのマクロな動きは抑制される。また、パンケーキは軸方向の厚みが少ないので、エポキシ含浸も容易である。電磁力による軸方向への動きが生じにくいので、非含浸法やパラフィン含浸法でもよい。

結局、パンケーキコイルは従来技術の延長で対応できるが、レイヤー巻きコイルには新しい技術が必要になる。

2.2 高電流密度での熱暴走に対するコイル保護

REBCO コイルを高電流密度で運転中に熱暴走が生じると、急激に昇温し焼損に至る。Dump 時間の観点から、detect&dump 方式で中規模以上の高電流密度コイルを保護するのは難しい。また、有効な dump 回路の導入は、電流密度の低下をもたらす。

MIT が開発した非絶縁方式(NI 方式)が、高電流密度コイルの保護に有効である。このコイルでは、熱暴走直後に、電流が径方向に外周へ流れ始め電流密度が下がるので、昇温が抑制される。これは、高電流密度 LTS コイルにおける高速常電導伝播と類似技術である。

一方、NI コイルは、励磁遅れを引き起こす欠点がある。

レイヤー巻き:レイヤー巻きコイルでは、同じ形状のパンケーキ巻きコイルに比べて、励磁遅れが 3 桁も長い(1 mH クラスのコイルでも 500 秒以上)。励磁によりコイル内部に大きなシールド電流ループが生じ、その消失に長時間を要するためである。(2A-a02 末富他)。長い励磁遅れは実用上の障害になる。

パンケーキ巻き:各ターンが接触抵抗でシャントされているので、基本的に励磁遅れが短い(1 mH クラスのコイルで 0.25 秒、2A-a02 末富他)。従って、大きなコイルでない限り、励磁遅れは大きな問題にはならないと考えてよい。

結局、保護の観点からは、レイヤー巻き NI コイルは実用的ではない。一方、パンケーキ NI コイルは、汎用性が高く拡張性が期待できる。レイヤー巻きの NMR や MRI では、NI とは別の保護技術の開発が必要である。

2.3 電磁誘導などの電磁現象

NI 方式の REBCO コイルは、実質的に内部にシャント抵抗を抱えているので、たとえ回路がオープンでも 2 次回路を作る。これは、LTS との組み合わせコイル系で技術課題を生む。

レイヤー巻き:NI コイルを、1 次コイル (LTS コイル) に対する 2 次回路と考える。コイルをオープンにしても NI コイルは巻線内部でシャントされているので、1 次コイル励磁中にシールド電流が誘導される。2 次回路の時定数が長いので、LTS コイルの励磁に伴い大電流が誘導され易く、熱暴走に至る可能性が生じる。NI なので基本的に熱暴走は起こりにくいが、一旦熱暴走するとコイルが損傷する可能性がある (2A-a03 柳澤他)。1 次回路(LTS コイル)がクエンチした場合にも、同様にして大きな電流が誘導される。

パンケーキ巻き:NI 方式により同様に 2 次回路が形成されるが、上記のように 2 次回路の時定数が短いのでレイヤー方式に比べると、誘導電流は少ない。

結局、電磁現象の観点からは、レイヤー巻き NI コイルは危険であり取扱いに注意を要するが、パンケーキ巻き NI コイルには危険な現象が生じない。なお、非 NI コイルの場合には、両巻き線方式の間で差異はないと考えている。

2.4 永久電流モード

NMR や MRI においては、永久電流モードで運転できる方が望ましい。最近、REBCO 線材同士で超電導接続に成功したという報告もあり、REBCO 永久電流コイルが視野に入ってきた。

レイヤー巻き:もし、線材単長を長くすることができれば、超電導接続の数を圧倒的に少なくできるので、安定な永久電流モード運転にはこの方式が望ましい。

パンケーキ巻き:原理的に超電導接続の数が多くなるので安定な永久電流モードでの運転は難しい。

結局、永久電流にはレイヤー巻きが適している。

3. まとめ

- (1) 高電流密度で高磁場の REBCO コイルにおいては、レイヤー巻きコイルとパンケーキ巻きコイルで技術課題に大きな差異があるので、両者を弁別して研究する必要がある。
- (2) HTS コイル化技術の観点からは、NI-パンケーキコイル方式が技術的なバランスが良く汎用性が高い。
- (3) 精密磁場や永久電流モード運転などを考慮すれば、レイヤー巻き方式の技術開発の必要性も高い。

非絶縁 REBCO レイヤー巻コイルの長い励磁遅れメカニズム

Mechanism of long charging delay in the NI REBCO layer winding coil

末富 佑, 柳澤 杏子, 名和 雅人, 李 晶, 齋藤 明子, 中込 秀樹(千葉大);

井口 聖威也, 高尾 智明(上智大); 柳澤 吉紀, 前田 秀明(理研)

SUETOMI Yu, YANAGISAWA Kyoko, NAWA Masato, LI Jing, SAITO Akiko, NAKAGOME Hideki(Chiba Univ);

IGUCHI Seiya, TAKAO Tomoaki(Sophia Univ); YANAGISAWA Yoshinori, MAEDA Hideaki(RIKEN)

1. はじめに

高電流密度 REBCO コイルでは、熱暴走からの保護が重要な課題である。非絶縁(no insulation: NI)法は REBCO コイルの熱暴走からの保護技術として有効であるが、一方で励磁遅れ[1]が十分短くなければ汎用的な実用化が困難になる。本研究では、ダブルパンケーキ巻(double pancake: DP)とレイヤー巻(layer winding: LW)の NI REBCO コイルの実験により励磁遅れを比較し、回路モデル計算により、時定数の定量化を行った。

2. 実験方法

フジクラ製の REBCO 線材(幅 5mm、厚さ 0.12mm、銅メッキ、絶縁なし)を用い、ほぼ同形状のダブルパンケーキ巻(DP)コイルとレイヤー巻(LW)コイルを製作し、77 K における電源遮断試験により回路時定数を計測した。コイル内径/外径/高さはそれぞれ 79.1 mm / 約 81 mm / 約 101 mm / である。自己インダクタンスは 0.93 mH (DP)、1.09 mH (LW)である。

3. 実験結果

Fig. 1 に(a) DP コイルと(b) LW コイルの磁場の変動の様子と時定数を示す。DP コイルと LW コイルの回路時定数 τ はそれぞれ 0.25 s、500 s であった。自己インダクタンスは同程度のコイルであるにもかかわらず、LW コイルは DP コイルよりも τ が 2000 倍も長く、顕著な差が見られた。これは非常に不思議な現象である。この理由を数値解析により調べた。

4. 回路モデル計算による考察

上記の実験により、LW コイルでは DP コイルと比べてはるかに長い回路時定数 τ (すなわち励磁遅れ)を示すことが明らかとなった。この差異のメカニズムを明らかにするために、両コイルの内部の電流の振る舞いをインダクタンスとターン間の接触抵抗からなる等価回路モデルを用いて調べた。仮定した回路モデルを Fig. 2 に示す((a)DP コイル、(b)LW コイル)。別途実施した実験結果に基づき、接触抵抗は径方向成分のみを考慮した。まず、電流掃引をしたときに、中心磁場が実験と同じ振る舞いをすることを確認し、モデルの妥当性を検証した。

0.16A/s で 10A まで励磁し、電源電流をホールドした後のコイル内部の周方向電流の分布を Fig. 3 に示す。DP コイルではコイル全体に均一な電流が流れている (Fig. 3(a))。一方、LW コイルでは、最初はコイルの表面部(コイル最内層、最外層、上下端)に電流が集中して流れ (Fig. 3(b))、時間が経つにつれてコイル内部に侵入していった。これは一種の表皮効果である。巻線内部では、接触抵抗を介した径方向電流により、隣接するレイヤー同士が結合している。この結果、励磁により、隣接する 2 層を回る大きなシールド電流が生じ、それが徐々に縮小していく。これは磁気拡散現象であるから、時定数はコイルの高さの 2 乗に比例することになり、時定数が非常に長くなる。この現象は、ツイストしていないマルチフィラメント線材に生じる結合電流の振る舞いによく似ている。DP コイルは、各パンケーキが絶縁されており、この中で磁気拡散が起こるため時定数が短くなるのである。こちらは、ツイストされたマルチフィラメント線材と似ている。

400MHz LTS/REBCO NMR 磁石[2]の内層 REBCO コイル (76 ターン×72 レイヤー)を非絶縁にした場合の励磁遅れを計算結果から推定すると、NMR 磁石に要求される磁場の変動率である 10^{-8} /h となるまでに、約 12 日かかることが分かった。これは、NMR 磁石として許容不可能な値ではないが、次報で述べる LTS コイルと組み合わせた場合の問題もあり、実用には時定数の抑制が必要である。なお、Ni 合金補強の Bi-2223 線材の場合には、この種の課題が抑制される可能性があるので、検討を進めている。

5. まとめ

NI REBCO レイヤー巻(LW)コイルにおける長い励磁遅れのメカニズムを、実験とモデル図により解明し、この現象を定量的に扱えるようになった。ダブルパンケーキ巻(DP)の場合、パンケーキ内で磁気拡散が起こるのに対し、レイヤー巻の場合は、各レイヤーがコイル軸方向全体にわたって結合するため、時定数が非常に長くなる。

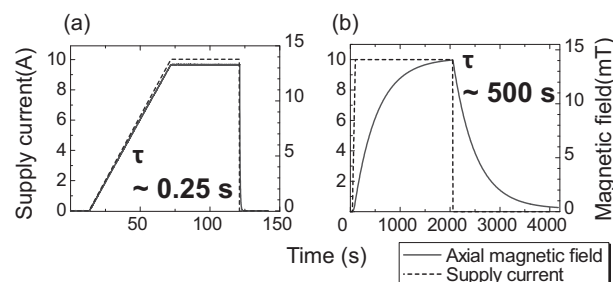


Fig.1 Measured magnetic field. (a) NI DP coil. (b) NI LW coil.

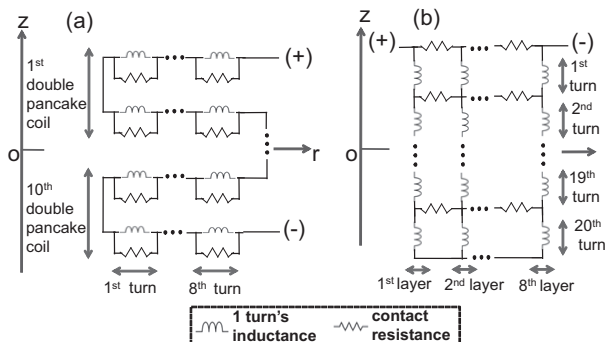


Fig.2 Circuit models. (a) NI DP coil. (b) NI LW coil.

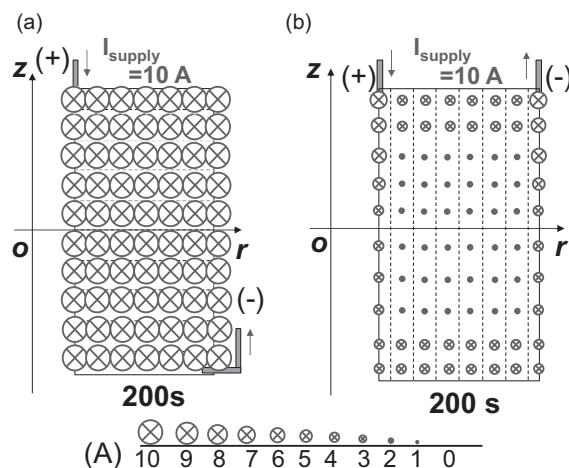


Fig.3 Circumferential current distribution. (a) NI DP coil. (b) NI LW coil.

参考文献

- Wang, et al.: Super. Sci. Tech., Vol. 26(2013) 035012
- Yanagisawa, et al.: J. Mag. Res., Vol. 249 (2014) 38-48

謝辞: 本研究は(独) 科学技術振興機構(JST)の研究成果展開事業「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。

非絶縁 REBCO コイルの長い回路時定数がもたらす課題 Problems of a long circuit time constant for a no-insulation REBCO Coil

柳澤 杏子, 末富 佑, 許 一, 名和 雅斗(千葉大); 井口 聖威也, 高尾 智明(上智大);

李 晶, 齋藤 明子, 中込 秀樹(千葉大); 松本 真治(NIMS); 濱田 衛(JASTEC); 柳澤 吉紀, 前田 秀明(理研)

YANAGISAWA Kyoko, SUETOMI Yu, XU Yi, NAWA Masato (Chiba Univ.); IGUCHI Seiya, TAKAO Tomoaki (Sophia Univ.);

LI Jing, SAITO T Akiko, NAKAGOME Hideki (Chiba Univ.); MATSUMOTO Shinji (NIMS); HAMADA Mamoru (JASTEC);

YANAGISAWA Yoshinori, MAEDA Hideaki (RIKEN)

E-mail: kyoko.yanagisawa@riken.jp

1. はじめに

前報[1]で、レイヤー巻(layer winding: LW)の非絶縁(no insulation: NI) REBCO コイルに生じる極めて長い励磁遅れのメカニズムを数値解析で明らかにした。本報では、この種の NI コイルを外層 LTS コイルと組み合わせて使用する場合に、長い時定数が実オペレーションにもたらす重要な課題を論じる。

2. 実験方法

SuperPower 社製の REBCO 線材(SCS4050, 幅 4 mm, 厚さ 0.1 mm, 線材総長 45.4 m)を使用して、内径 79.2 mm、外径 80.7 mm、長さ 103.5 mm、レイヤー数 8、総ターン数 182 の NI LW コイルを製作した。巻線外周には真鍮線のバインダーを 6 層巻いた。自己インダクタンスは 1.62 mH である。このコイルを NIMS の 17 T LTS コイルの内層に設置した(Fig. 1 参照)。中心磁場をホール素子で計測した。

まず、非絶縁レイヤー巻 REBCO コイルのみに 10A 通電したところ、励磁遅れの時定数は 2868 s と極めて長い時間であった。その後、NI レイヤー巻 REBCO コイルの回路をオープンにした状態で、LTS コイルを励磁した。

3. 実験結果

LTS コイルを通電した結果を Fig. 2 に示す。通電開始後、磁場は非常にゆっくり上昇した(Fig. 2(b)矢印(A)参照)。これは、LTS コイル磁場により、NI レイヤー巻 REBCO コイルのショート回路(2 次回路)に誘導電流が生じ、LTS 磁場が部分的に遮蔽されたためである。その後、LTS コイルの励磁をつづけたところ、 $I_{LTS} = 68.7$ A の時点で、NI レイヤー巻コイルが熱暴走を起こした(Fig. 2(b)矢印(B)参照)。これにより、遮蔽磁場が消え、中心磁場が 3.25T から 4.82T に急上昇し、LTS コイルはダンブモードになった。遮蔽磁場(1.57 T)から逆算すると、熱暴走時の実効的な誘導電流は 863A ($J_c = 2158$ A/mm²) である。実験後の観測によれば、電極付近の線材の焼損と(Fig.3 参照)と、巻線部における座屈が見られた。

4. 考察

別報[1]に示すように、NI レイヤー巻 HTS コイルでは、コイル内部に2つの層に亘る大きなショート回路(2 次回路)が形成され、この回路に誘導されたシールド電流が長時間消失しないので、非常に長い励磁遅れが生じる。一方、多コイル系では、オープン状態でも、LTS コイルの励磁により、大きなシールド電流が NI HTS コイル内部に生じ、LTS 磁場の遮蔽や過剰な誘導電流による熱暴走を引き起こす。LTS コイルでもターン間ショートのあるコイルで励磁中の熱暴走と回復が報告されているが、HTS コイルではクエンチが起こりにくいため、非常に大きな電流が誘導されてしまい一旦熱暴走すると破壊に至ることになる。この系の場合、NI コイルであることが逆に熱暴走の発生を抑制し、熱暴走電流を大きくしてしまった。NI コイルでありながら、焼損した理由は、レイヤー巻 NI コイルでは、出入り口付近で電流密度が高くなる[2]為であり、NI の場合にこの部分が弱点になるのは、従来から指摘されている通りである。対策として、LTS コイルの励磁率を NI HTS コイルの励磁遅れに対応する値まで遅くすることが有効である。当日の発表では、Ni 合金補強 Bi-2223 線材の NI レイヤー巻コイルにおける励磁遅れと比較して論ずる。

5. まとめ

非絶縁レイヤー巻 REBCO コイルの長時定数が実オペレーションにもたらす重要な課題を、LTS コイルとの組み合わせで示した。NI REBCO ならではの「長時定数」と「熱暴走にくい特性」によって、熱暴走が起きた場合の電流密度が高くなることが明らかになった。

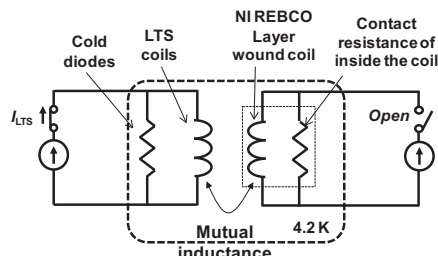


Fig.1. Schematic circuit for the charging experiment of the LTS outer coils, inside which an open state no-insulation layer-wound REBCO coil was nested. All the coils were in liquid helium (4.2 K).

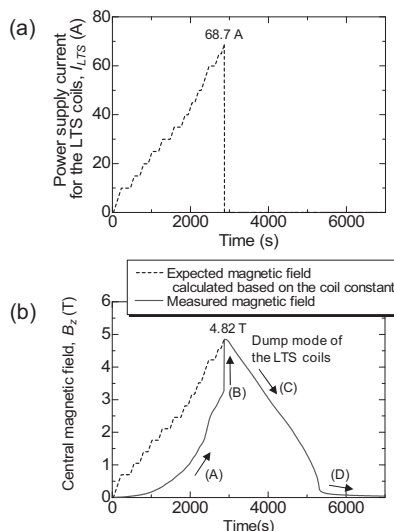


Fig.2. (a) Power supply current for the LTS coil.(b) Expected magnetic field and measured magnetic field at the center (4.2K).

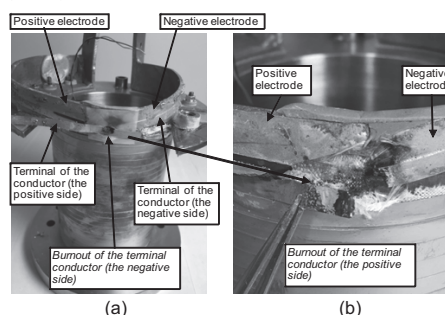


Fig.3. Photographs of the NI REBCO LW coil after the experiment. Burnout of the conductor is observed for (a) the negative terminal conductor and (b) the positive terminal conductor.

参考文献

- [1] 末富他, 2015 年度秋季低温工学・超電導学会, 2A-a02.
- [2] Yanagisawa et al., Physica C, 499 (2014) 40-44

謝辞: 本研究は(独) 科学技術振興機構(JST)の研究成果展開事業「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。

Ni 合金補強の高強度 Bi-2223 線材の熱暴走により生じる座屈のメカニズム

Buckling of a Ni-alloy reinforced high-strength Bi-2223 conductor due to a thermal runaway

名和 雅斗, 李 晶, 齋藤 明子, 中込 秀樹(千葉大); 梶田 健太郎, 高尾 智明(上智大); 柳澤 吉紀, 前田 秀明(理研)
 NAWA Masato, LI Jing, SAITO Akiko, NAKAGOME Hideki (Chiba univ.); KAJITA Kentaro, TAKAO Tomoaki (Sophia univ.);
 YANAGISAWA Yoshinori, MAEDA Hideaki (RIKEN)
 E-mail: masato.nawa@riken.jp

1. はじめに

プレ引張を施した Ni 合金で補強した高強度 Bi-2223 線材は、コンパクトな高磁場磁石を実現する上で有望である[1]。この線材で巻いたコイルが熱暴走を起こし、温度が過度に上昇すると、線材の内部ひずみが解放され、超伝導フィラメント/銀に座屈が生じることを報告した[2]。この現象が、隣接するターンに伝播することで連鎖的なコイル破壊が起き、アークでコイルが破壊される可能性がある[3]。そこで、本報では、室温モデル試験により、座屈のプロセスを明らかにして、基本的な防止策を示した。

2. 実験方法

高強度 Bi-2223 線材(住友電工 Type HTi-XX, 幅 4.5 mm, 厚さ 0.29 mm, 77 K での臨界電流>190 A)を内径 30, 50, 115 mm の FRP 製巻き枠に半周だけ巻き付け、室温において、内周側からヒーター加熱を行い、コイル熱暴走時の温度上昇を想定したモデル試験を行った。モデルのポイントは線材の曲げひずみを考慮した点である。線材内周側の温度を約 200℃まで上昇させ、この際の加熱部近傍の周方向ひずみ(外周側)と温度(外周側および内周側)を測定した。また線材の臨界電流値を加熱前後で比較した。

次に、線材破壊の対策として、線材面に垂直の面圧 σ_t を加える方法を試みた。円盤治具につるした線材の両端部に張力をかけると、対応した面圧 σ_t が生じる。 σ_t は、以下の式で算出した。 $\sigma_t = 2dF/D$ (d は線材厚み、 F は重りによる引っ張り力、 D は直径である)。面圧を加えた状態で加熱し、上記と同様の測定を行うとともに、加熱前後の臨界電流の変化を調べた。

3. 結果及び考察

$D = 30$ mm, $F = 0$ kg の場合の結果を示す。Fig. 1 に示すように温度上昇に伴い、線材外周側に圧縮ひずみが生じた。これは、温度上昇により Ni 合金と超伝導フィラメント/銀を張り合わせている半田が徐々に溶融し、曲げひずみの緩和が生じたためである。その後、200℃付近において引っ張り方向に 0.18% のひずみの飛びが生じた。この時、Fig. 2 に示すように Ni 合金補強材の剥離、超伝導フィラメント/銀の折れ曲がり(座屈)が生じた。これは、補強材の曲げひずみ(外周側は引張、内周側は圧縮)が一気に解放され、線材を座屈させたことを示している。Fig. 1 で見られた引っ張り方向のひずみの飛びは、Fig. 2 に示す線材の鋭い折れ曲がりを見出したものである。実験後、臨界電流値(I_c)は 5 A にまで減少していた。

線材に張力を印加した場合、 σ_t や D によって、座屈が起こる場合と起こらない場合が見られた。整理した結果を Fig. 3 に示す。横軸は σ_t 、縦軸は加熱実験後の I_c を示す。 $D = 115$ mm の場合、 σ_t を印加しなくとも座屈と I_c の劣化は起きなかった。また、 $D = 50$ mm の場合は 42 kPa 以上の σ_t を、 $D = 30$ mm の場合は 437 kPa 以上の σ_t を印加することで、座屈と I_c の劣化を防ぐことができた。この結果は、高強度 Bi-2223 コイルの熱暴走時に生じる座屈は、(1) 曲げ径が小さい程発生しやすいこと、(2) 面圧の印加により防止できるが、曲げ径が小さい程大きな面圧を要することを示唆している。この防止方法を実コイルへ応用する場合、非含侵コイルやパラフィン含侵コイルの場合には、巻線、冷却、励磁の工程における面圧の解析を設計段階で実施し定量化する必要がある。また、エポキシ含侵の場合にはこの種の検討は不要である。

4. まとめ

高強度 Bi-2223 コイルの熱暴走時に起こる線材座屈は、補強材のひずみエネルギーの解放が原因であり、曲げ径が小さいほど、この現象が顕著に表れることを明らかにした。これを防ぐには、コイル径方向の面圧の利用が有効である。

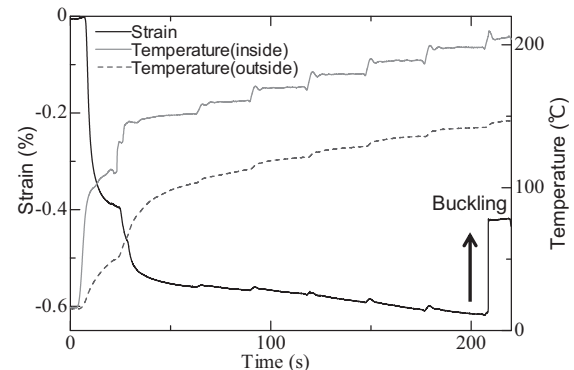


Fig.1 Circumferential strain of the outer reinforcement and temperature during a heating experiment. $D = 30$ mm.

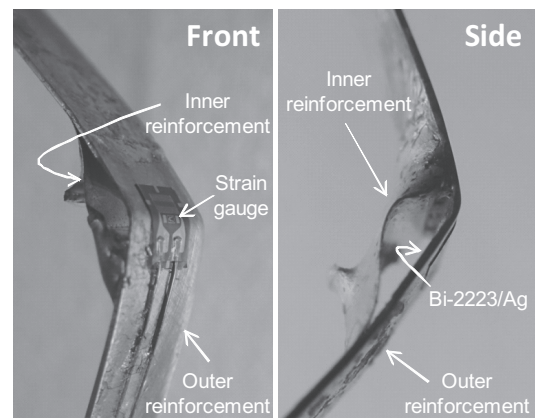


Fig.2 A buckled conductor after the heating experiment for $D = 30$ mm.

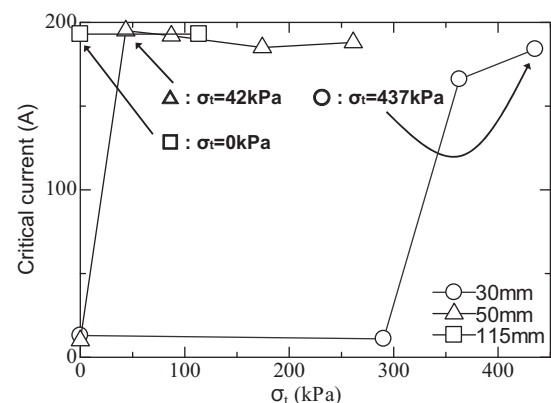


Fig.3 Effect of a transverse compressive stress on buckling.

5. 参考文献

1. Nakashima et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 25 (2015) 6400705
2. Kajita et al., IEEJ 2015 5-083
3. Nawa et al., Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 90 (2014) 1P-p14

m 級無絶縁 REBCO パンケーキコイルの基礎特性評価: 局所的常電導転移時における負荷率と銅安定化層厚みの熱的安定性に対する影響

Evaluation of Basic Characteristics of No-Insulation REBCO Pancake Coil: Influence of Cu Stabilizer Layer Thickness and Load Factor on Thermal Stability in m-class No-Insulation REBCO Pancake Coil

池田 愛花, 勝俣 一輝, 大木 隆広, 賈 昀昊, 王 韜, 石山 敦士(早稲田大学); 野口 聡, 門馬 克敏(北海道大学);
渡辺 智則, 長屋 重夫(中部電力)

IKEDA Aika, KATSUMATA Kazuki, OKI Takahiro, JIA Yunhao, WANG Tao, ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.);
NOGUCHI So, MONMA Katsutoshi (Hokkaido Univ.); WATANABE Tomonori, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power Co., Inc)
E-mail: atsushi@waseda.jp

1. はじめに

無絶縁 REBCO 線材を巻線したコイル(以下「無絶縁(NI: No-Insulation)コイル」)を用いることで、本来二律背反の関係にある高電流密度化と高熱的安定化の両者を満足できると考えられている。これまで、我々は小口径コイルの局所的常電導転移時の電磁的・熱的挙動について報告してきた[1]。今回は、局所的常電導転移が生じた際の銅安定化層厚みの熱的安定性への影響について、MRI用などの実応用を想定し m 級 NI コイルを対象として、解析・評価を行ったので報告する。

2. 解析方法

解析モデルは PEEC(Partial Element Equivalent Circuit) モデル(Fig.1)を用いた。PEEC モデルは、コイル内部の電流分布を周方向に分割したものであり、電流分布をより詳細に明らかにすることができる。今回はこの PEEC モデルと熱解析を連成して、局所的超電導線材劣化時の振る舞いを解析した。解析対象としたコイルの諸元を Table.1 に示す。実応用を想定し、内径 1m のコイルとした。中央 135 層目の一番初めの要素で超電導線材が劣化したと仮定して解析を行った。また、銅安定化層を 1.5, 20 μm にしたときについて検討を行った。

3. 解析結果

絶縁 REBCO 線材を巻線したコイル(以下「絶縁(INS: Insulation)コイル」)と NI コイルのコイル温度上昇について比較した。銅安定化層 5, 20 μm , 負荷率 70%, 線材劣化が生じてから 5 秒後のときのコイル温度分布解析結果を Fig.2 に示す。コイル温度上昇を ΔT_{max} とすると、銅安定化層 20 μm のとき INS コイルでは 18.3K, NI コイルでは 0.0001K であった。銅安定化層厚みを薄くした場合、INS コイルでは顕著に温度上昇が発生するが、NI コイルの場合ほとんど温度上昇が見られなかった。次に INS・NI コイルの発熱要因について検討した。超電導コイルの発熱要因として、層間接触抵抗・銅安定化層・超電導層の 3 つが考えられる。銅安定化層厚 5 μm , 線材劣化から 0.1s 後の発熱量[W]を比較すると、INS コイルにおける発熱量の総量は NI コイルにおける発熱の総量の約 3 万倍となった。また、INS コイルにおける発熱の原因は線材劣化部分での銅安定化層の発熱が 99.9%を占めているのに対し、NI コイルでは層間接触抵抗による発熱が 74%, 超電導層での発熱が 25%であった。つまり、NI コイルでは銅安定化層厚みを薄くしても、発熱量・温度上昇に大きな差はみられないことがわかる。今後は運転温度を 20K にし、運転電流が大きいときの m 級 REBCO パンケーキコイルについて検討を行う予定である。本研究は科研費基盤研究 A(No.26249036)によった。

参考文献

1. T. Wang, S. Noguchi, et al., "Analysis on Transient Behaviors of No-insulation REBCO Pancake Coil during Over-Current and Sudden Discharging," IEEE Trans. Applied Supercond., vol. 25, no. 3, 2015

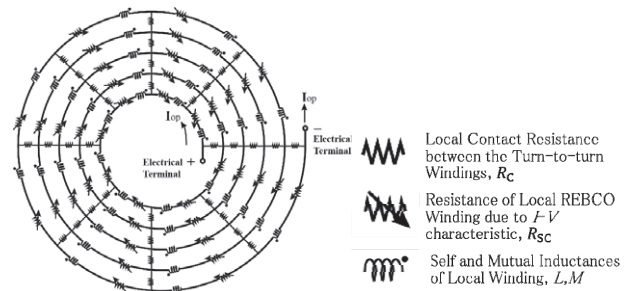


Fig.1 Partial Element Equivalent Circuit Model

Table.1 Specification of No-Insulation REBCO pancake coils

REBCO conductor	Overall (mm)	4.02
	Copper stabilizer thickness (μm)	Variable
	Tape Ic @77K, self-field (A)	>115
Coil	i.d; o.d (m)	1.00
	Height (mm)	4.02
	Turns	270
	Coil Ic @77K, self-field (A)	36.2
	Contact surface resistivity ($\mu\Omega \cdot \text{cm}^2$)	70
	Inductance (H)	0.220

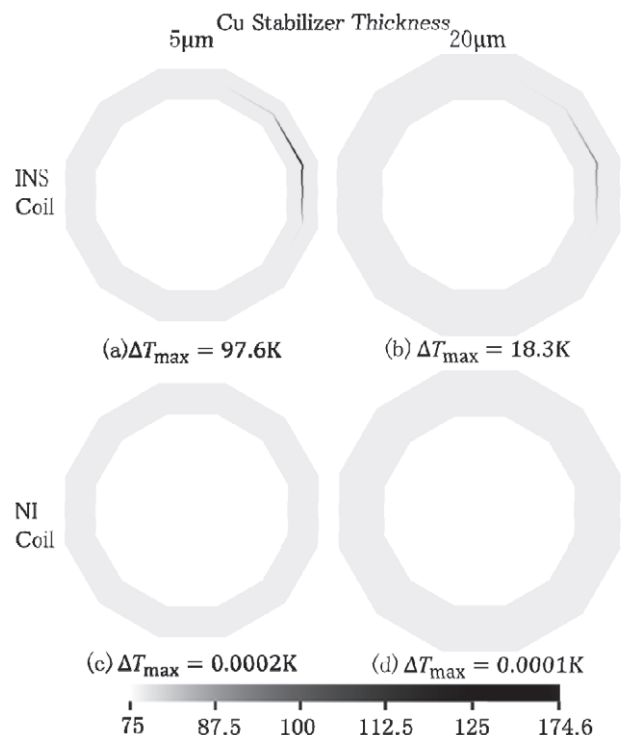


Fig.2 Temperature distribution at 5s after a permanent damage occurred: (a) INS Coil with Cu-stabilizer thickness of 5 μm ; (b) INS coil, 20 μm ; (c) NI coil, 5 μm ; (d) NI coil, 20 μm

m 級無絶縁 REBCO パンケーキコイルの基礎特性評価: 局所的常電導転移時における層間接触抵抗の熱的安定性に対する影響 Evaluation of Basic Characteristics of m-class No-Insulation REBCO Pancake Coil: Influence of Turn-to-turn Contact Resistance on Thermal Stability during Local Normal-state Transition

勝俣 一輝, 池田 愛花, 大木 隆広, 矢代 聡佳, 王 韜, 賈 昀昊, 石山 敦士(早稲田大学);
野口 聡, 門馬 克敏(北海道大学); 長屋 重夫, 渡部 智則(中部電力)
KATSUMATA Kazuki, IKEDA Aika, OKI Takahiro, YASHIRO Satoka, Wang Tao, JIA Yunhao,
ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.); NOGUCHI So, MONMA Katsutoshi (Hokkaido Univ.);
NAGAYA Shigeo, WATANABE Tomonori (Chubu Electric Power Co., Inc)
E-mail: atsushi@waseda.jp

1. はじめに

従来の超電導コイル設計・製作においては、局所的線材劣化発生時にコイルに蓄積されたエネルギーが転移部で消費され、ホットスポットの形成に留意する必要があった。一方無絶縁コイル(NI コイル)の場合には、電流は転移部を避けてコイル巻線層間方向に分流し、ホットスポットの形成が抑制される可能性がある。今回は局所的に線材劣化が発生した時の振る舞いについて PEEC モデルを用いた電流分布解析と FEM に基づく熱解析を行い、m 級コイルを想定して評価を行ったので報告する。

2. 解析方法

今回の解析で用いたコイルの諸元を Table.1 に示す。解析は Fig.2 の PEEC モデルによる電流分布解析と FEM による熱解析を連成して行い、層間接触抵抗 R_{ct} を変化した場合の局所的線材劣化発生時の振る舞いについて評価を行った。コイル熱容量は線材を銅安定化層とハステロイ基盤の合成熱容量として線材内の占有率をもとに算出し、熱計算は断熱条件で行った。また線材劣化は内側から 135 層目の始まりに配置し、通電電流はコイル $I_d(=36.2A)$ を基準に負荷率 70%(25.3A)とした。

3. 解析結果

層間接触抵抗 R_{ct} を変化した場合の解析結果を Figs.3, 4 に示す。局所的線材劣化発生により電流は劣化部を避けるように分布し、劣化部直前 1 層での転流と劣化部の安定化層長手方向の電流分布が顕著に表れる。その結果 Fig.3 のように劣化発生層の周辺層での温度上昇が起こる。しかしこの温度上昇は劣化発生後 10.0s でわずか 0.01K 程度である。

またこのときのコイル全体の発熱量に対する転流による発熱量の割合および転流による発熱量と R_{ct} の関係を Fig.4 に示す。これより転流による発熱量は R_{ct} の増加と共に増大していき、 $3.5 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 付近から減少していくことが分かる。これは $3.5 \Omega \cdot \text{cm}^2$ までは発熱量に対して R_{ct} の増加による影響が支配的であるのに対し、それ以上では転流の減少による影響が上回るためであると考えられる。そして全体の発熱量に対する転流による発熱量の割合は $0.35 \Omega \cdot \text{cm}^2$ までは 90%以上となっており、これにより劣化発生によるホットスポット形成が抑制されていることが分かる。一方転移部の安定化層長手方向の電流は R_{ct} と共に増大していき、温度上昇も大きくなっていく。

これらの理由により R_{ct} の増大に伴って温度上昇のピークは高くなっていくが、ある値(今回は $0.35 \Omega \cdot \text{cm}^2$)までは転流分担による高い熱的安定性が見込まれる。それ以上の R_{ct} では転流の減少により劣化発生部分での発熱が顕著になり、熱的安定性は低下していくと考えられる。

今後は大口径多段パンケーキコイルを対象とした解析を行っていく予定である。

本研究は科研費基盤研究 A(No.26249036)によった。

Table.1 Specification of No-Insulation REBCO pancake coils

REBCO conductor	Overall width; thickness(mm)	4.02; 0.061
	Copper stabilizer thickness(μm)	5 per each side
	I_c @77K,self-field(A)	>115
Coil	i.d ; o.d (m)	1.00;1.033
	Height(mm)	4.02
	Turns	270
	I_c @77K,self-field(A)	36.2
	Contact surface resistance	Variable
	Inductance(H)	0.220

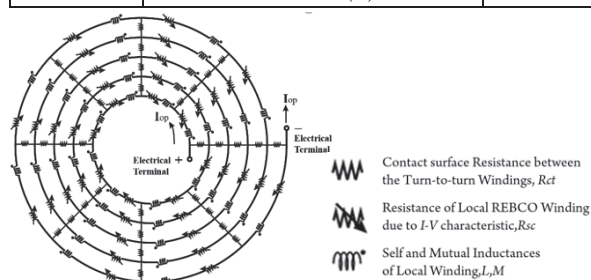


Fig.2 Partial Element Equivalent Circuit Model

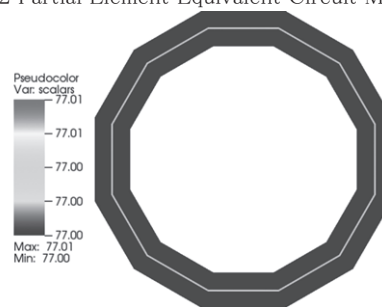


Fig.3 Temperature distribution in the coil

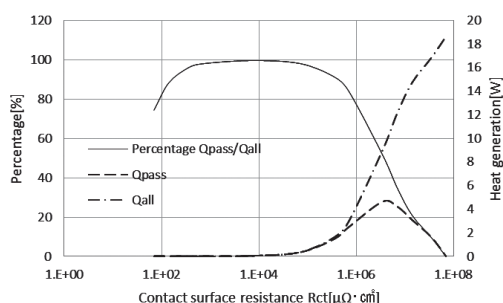


Fig.4 Heat generation by translocation current

参考文献

1. T. Wang, S. Noguchi, et al., "Analysis on Transient Behaviors of No-insulation REBCO Pancake Coil during Over-Current and Sudden Discharging," IEEE Trans. Applied Supercond., vol. 25, no. 3, 2015

2次元有限要素法を用いた無絶縁超電導コイルのターン間電流経路解析 Analysis on Turn-to-Turn Current Path of No-Insulation REBCO Pancake Coil

川口 浩平, 門馬 克敏, 野口 聡(北大); 石山 敦士(早大)

KAWAGUCHI Kohei, MONMA Katsutoshi, NOGUCHI So (Hokkaido Univ.); ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.)

E-mail: noguchi@ssi.ist.hokudai.ac.jp

1. はじめに

REBCO パンケーキコイルのターン間に絶縁を施していない無絶縁巻線技術が近年注目されている。無絶縁 REBCO コイルでは、電流が REBCO 線の接触面を通して隣接 REBCO 線に流れることができるため、熱的安定性の向上や高電流密度化が見込める。しかしながら、この転流現象における電流経路の詳細は明らかになっていない。そこで、無絶縁 REBCO パンケーキコイルのターン間電流経路を、2次元有限要素法を用いて解析した。解析結果から、コイルの接触抵抗、安定化層の厚みの違いによる転流のメカニズムの特徴を明らかにする。

2. 解析手法と解析モデル

無絶縁 REBCO パンケーキコイルにおける電流分布などの全体的な振る舞いは、PEEC モデルによって解析されてきた[1]。しかし、コイルターン間の迂回電流の詳細な分布などの局所的な様子は、まだ十分に調査されていない。そこで、ターン間電流経路についての解析を行い、ターン間接触抵抗、銅安定化層厚みの違いによる電流分布に関する調査を行う。

ターン間電流経路を調べるために、REBCO テープ線の断面に対して2次元有限要素法を用いた電流密度解析を行う。支配方程式を式(1)に示す。

$$\nabla \cdot \sigma \nabla \varphi = 0 \quad (1)$$

ここで σ , φ はそれぞれ導電率, スカラーポテンシャルである。REBCO 線間の接触面は、二重節点手法を用いて表現する[2]。二重節点に関する方程式を式(2)に示す。

$$\varphi_l - \varphi_r = \rho_{ct} J_{ct} \quad (2)$$

ここで、 φ_l , φ_r , ρ_{ct} , J_{ct} はそれぞれ左側ターンのポテンシャル, 右側ターンのポテンシャル, 接触抵抗率, ターン間の電流密度である。以上の解析手法を用いて、図1に示す REBCO テープ線が3ターン配置されたモデルにおいて解析を行う。

3. 解析結果

図1における3ターンのテープ線のうち、中央のターンにおいて REBCO 層の超電導特性が失われて常電導状態となった条件を仮定し、左右のターン間に 1.0 A/cm の周方向単位長さ当りの電流が流れる条件のもと、銅安定化層の厚みが 10, 20, 40 μm である3ケースに対して、テープ線間の接触抵抗を 10^{-4} から $10^4 \mu\Omega \cdot \text{cm}^2$ の範囲で変化させて解析を行った。

図2は、銅安定化層の厚みをそれぞれ 10, 20, 40 μm とした場合の電流密度分布を示している。銅安定化層の厚さにかかわらず、電流経路に大きな変化がないことが分かる。

図3は、銅安定化層の厚み3ケースにおける径方向抵抗率 ρ_t (銅, ハステロイの抵抗分を含む)を縦軸にとり、横軸を接触抵抗率 ρ_{ct} としたグラフを示している。3ケースともに、ほぼ径方向抵抗率が接触抵抗率と一致していることが分かる。つまり、接触面における抵抗が径方向全体の抵抗に対して支配的であるといえる。したがって、径方向の抵抗の視点では、銅安定化層の厚みは寄与しないことが分かる。

本研究は科研費基盤研究 A(No.26249036)によった。

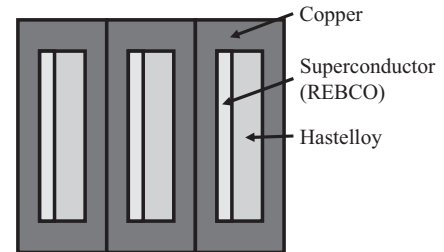


Fig. 1. The schematic view of three aligned cross sections of NI REBCO tape.

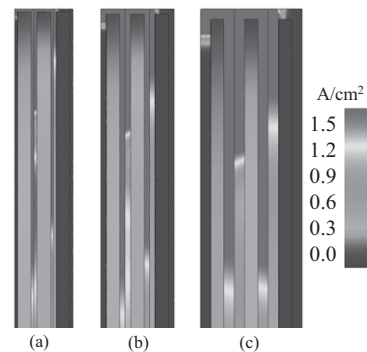


Fig. 2. The current distributions with copper stabilizer thicknesses of (a) 10, (b) 20, and (c) 40 μm , with $\rho_{ct} = 10^{-2} \mu\Omega \cdot \text{cm}^2$.

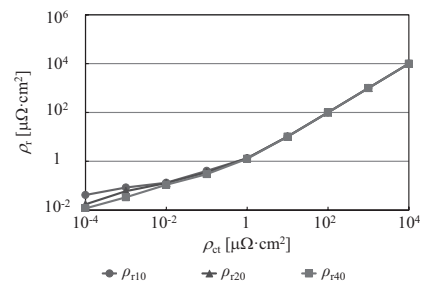


Fig. 3. The contact resistivity ρ_{ct} versus the coil-radial contact resistivity ρ_t with different copper stabilizer thicknesses.

参考文献

1. T. Wang, S. Noguchi, X. Wang, I. Arakawa, K. Minami, K. Monma, A. Ishiyama, S. Hahn, and Y. Iwasa: "Analysis of Transient Behaviors of No-Insulation REBCO Pancake Coils During Sudden Discharging and Overcurrent," IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 25, No. 3 (2015) Art. ID. 4603409.
2. Y. Kamiya and T. Onuki: "3D eddy current analysis by the finite element method using double nodes technique," IEEE Trans. Magn., Vol. 32, No. 3 (1996) pp. 741-744.