

Yoroi-coil の電極構造が HTS コイルの熱応力及び電磁応力分布に与える影響

Influence of the Electrode Structure in Yoroi-coil on Thermal and Electromagnetic Stress Distributions in HTS Coil

加藤 雅大, 宮城 大輔, 津田 理, 高橋 弘紀, 淡路 智(東北大)

KATO Masahiro, MIYAGI Daisuke, TSUDA Makoto, TAKAHASHI Kohki, AWAJI Satoshi (Tohoku Univ.)

E-mail: masahiro.kato.r2@dc.tohoku.ac.jp

1. はじめに

強磁場生成は新現象発見の宝庫と考えられており、銅マグネットよりもコンパクトかつ省電力な超電導マグネットが注目を集めている。しかし、強磁場化に伴い、超電導線材に強力なフープ応力が作用することで、超電導線材が破壊される恐れがある。この課題に対して、コイル体積の増大を抑えつつ、強力な電磁力に耐えうる構造として、Yoroi-coil 構造が提案されている[1]。しかし、これまでは、電極構造など、実用化を想定した詳細検討は十分に行われていない。そこで、本研究では、冷却時の熱応力及び通電時の電磁応力について、電極構造を考慮した応力分布解析を実施し、電極構造が Yoroi-coil の応力低減効果に及ぼす影響について検討した。

2. 解析方法

解析した Yoroi-coil の諸元を Table 1 に示す。また、解析モデルの上面図および断面図を Fig.1 に示す。本解析では、Yoroi-coil 構造の対称性を考慮して 1/8 モデルを作成した。解析モデルでは、電極構造を考慮し、ボルトに見立てた円柱ジオメトリを配置することによりボルト固定構造を模擬した。また、超電導コイルを一体物として扱い、コイル外周面と補強構造部の接触面および各ボルトと補強構造部の接触面に接触条件を適用することで応力の伝達を模擬した。冷却時の熱収縮を考慮するため、コイル構造全体を 293K から 4K に冷却し、定常熱応力を計算した。コイルには、バックアップ磁場として z 軸正方向の 11T が印加されているとし、コイル電流が 100 A の場合の応力分布を、三次元有限要素法により解析した。

3. 解析結果及び考察

電極に追加したボルト本数と、超電導コイルに作用するフープ応力最大値の関係を Fig.2 に示す。Fig.2 から、ボルト追加前は超電導コイルの電極付近において、最大 250MPa 程度のフープ応力が働いていることがわかる。電極部には補強材が設けられていないため、電極固定用ボルトの周辺では冷却時及び通電時に超電導コイルが曲げられ、応力値が増加したと考えられる。これに対し、電極部にボルトを 1 本追加し、電極部を補強した場合は、超電導コイルに働く応力が大きく低減した。この時のコイルのフープ応力分布を Fig.3 に示す。電極部にボルトを追加することで、電極側から補強材の圧縮力が超電導コイルに伝達し、コイルの最大フープ応力が低減したと考えられる。しかし、ボルトを追加していくにつれて、電磁力による応力は減少するものの、熱収縮による応力は増加した。これは、ボルト本数を増やすにつれて、電磁応力は減少するものの、補強材からの圧縮力がコイルに伝達するためであると考えられる。以上より、電極補強にはボルトの追加が有効であるが、電磁力だけではなく熱応力の影響も加味して適切なボルト本数を選定する必要があると考えられる。

4. 謝辞

本研究は、科研費(15H03586)の助成を受けて実施したものである。

Table 1 Specifications of a Yoroi-coil

Superconducting wire type	PLD-GdBCO-IBAD
HTS tape width	4.1 mm (Average)
HTS tape thickness	131 μ m
Wire length	50 m
Inner/Outer diameter of coil	250 / 265 mm
Number of turns	55/PC
Frame and plates	SUS316L
Separating plate	G-FRP

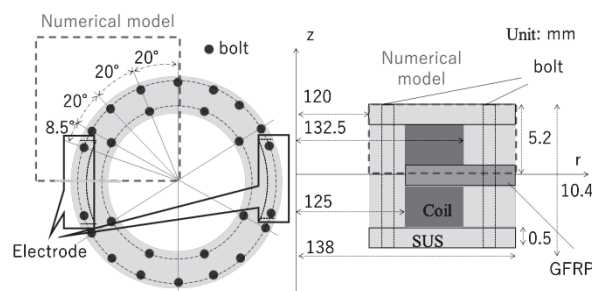


Fig.1 Analytical model of a Yoroi-coil.

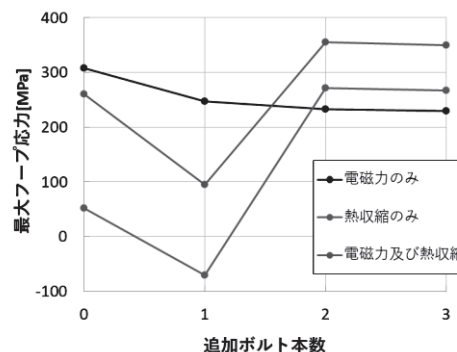


Fig.2 Maximum hoop stress of a coil as a function of the number of additional bolts.



Fig.3 Hoop stress distribution of a coil when the number of additional bolts was one.

参考文献

1. 渡部智則・長屋重夫・平野直樹・淡路智・小黒英俊・石山敦士・王旭東:「高強度パンケーキコイル構造 (Yoroi-coil) の開発」, 低温工学, Vol.48, No.5 pp.213-219 (2013)

積層された REBCO パンケーキコイルの交流損失特性に コイル積層数・使用線材が与える影響

AC loss characteristics of REBCO pancake coil assemblies with different coil configurations and conductors

曽我部 友輔(京大・学振 DC1); Zhenan Jiang, Stuart C. Wimbush, Nicholas M. Strickland, Mike Staines,
Nicholas J. Long(RRI, VUW); 雨宮 尚之(京大)

SOGABE Yusuke (Kyoto University, JSPS DC1); JIANG Zhenan, WIMBUSH Stuart C., STRICKLAND Nicholas M.,
STAINES Mike, LONG Nicholas J. (RRI, VUW); AMEMIYA Naoyuki (Kyoto University)

E-mail: y-sogabe@asl.kuee.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

REBCO 薄膜線材で構成されたコイルを交流機器に応用する場合、交流損失の精密な予測が必要不可欠である。我々は積層されたダブルパンケーキコイル(DPC)を対象に、コイル積層数およびDPCを構成する線材の導電特性がDPC群の交流損失特性に与える影響を実験及び解析によって評価した。

2. 2次元電磁界解析モデルと導電特性定式化

積層されたDPC群について、軸対称近似および薄板近似を適用し、2次元断面電磁界解析を行った[1]。

今回の電磁界解析では、REBCO 薄膜線材の電界 E -電流密度 J 特性として n 値モデルを用いた。 n 値モデルにおける臨界電流密度 J_c および n 値の磁場強度 B および磁場印加角度 ϕ 依存性は、短尺線材の通電法による測定結果を基に定式化した。本研究においては、異なる3種のREBCO 薄膜線材を対象に測定および定式化を行った。

3. 積層数・使用線材が異なるDPC群における交流損失特性

Table 1 に解析対象としたコイル群の諸元を示す。なお、実験においては DPC を対象としたが、断面解析においては DPC の3次元形状は無視されているため、DPC1 個はシングルパンケーキコイル 2 個の積層としてモデル化されている。また、線材#1 と線材#2 は同等の臨界電流 I_c をもつが、線材#3 の I_c は他 2 種の線材の I_c の約 2 倍である。

Fig. 1 にコイル#1 とコイル#2 における断面電磁界解析結果と測定結果を示す。両者の結果はよく一致しているため、この電磁界解析モデルは種々のコイルを対象とした精密な交流損失評価に耐えるものであると評価できる。

Fig. 2 にコイル#1-#3 の断面における、交流損失の時間変化がピークとなる時刻での交流損失密度分布を示す。これらの結果から、交流損失密度はコイル端部に顕著に集中することが確認された。コイル#1 と#2 を比較すると、コイル#2 ではコイル端部により大きな損失密度が発生していることがわかる。これは線材経験垂直磁場が大きくなるためである。一方、コイル#2 と#3 を比較すると、同じコイル形状であるにも関わらず、損失密度の大きさが変化していることがわかる。これはコイル#3 では、コイル端部に高 I_c 線材を使用したためである。

Table 1 Specifications of analyzed coil assemblies

Coil no.	#1	#2	#3
Number of pancake coils	4	12 (8 in CW / 4 in EWs)	
Conductor used	#1	#1 (EW) #2 (CW)	#3 (EW) #2 (CW)
Number of turns in each coil	20		
Total conductor length	16.66 m		49.97 m

EW means end winding, CW means central winding.

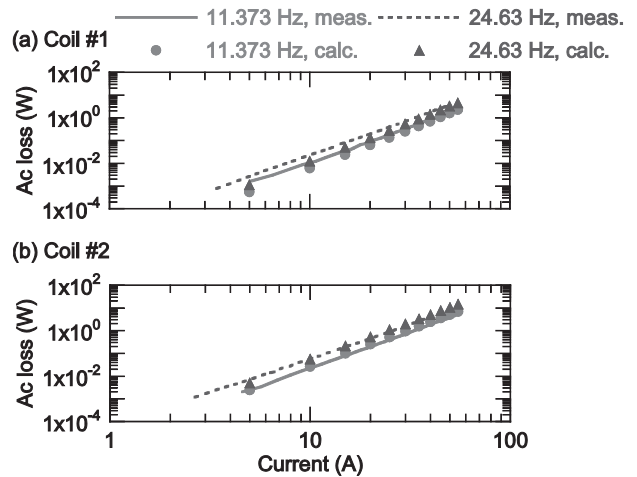


Fig. 1 Comparison between measured and calculated ac losses for (a) coil #1 and (b) coil #2.

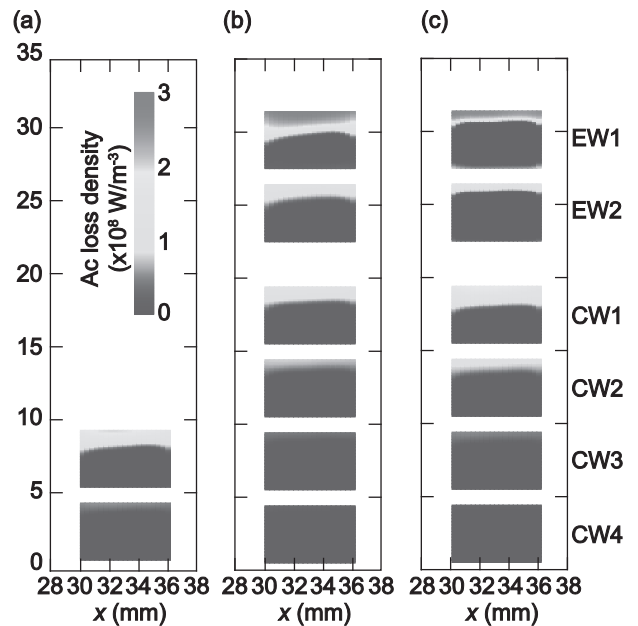


Fig. 2 Ac loss density distributions in (a) coil #1, (b) coil #2, and (c) coil #3.

謝辞

本研究の一部は科学技術振興機構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。

参考文献

1. N. Amemiya, et al.:Physica C, **310** (1998) p. 16–29

4フィラメント GdBCO テープ2枚重ね巻きコイルの通電特性 Properties of four-filaments Gd123 tape coil with two tapes co-winding

今井悠斗, 岡田達典, 高橋弘紀, 淡路智 (東北大);
宮崎寛史, 岩井貞憲, 井岡茂 (東芝); 藤田真司, 大保雅載, 飯島康裕 (フジクラ)
Y. Imai, T. Okada, K. Takahashi, S. Awaji (Tohoku Univ.);
H. Miyazaki, S. Iwai, S. Ioka (Toshiba); S. Fujita, M. Daibo, Y. Iijima (Fujikura)
E-mail: imai_yuto@imr.tohoku.ac.jp

1. はじめに

東北大に設置された 25T 無冷媒超伝導マグネットの 30T へのアップグレードに向けた R&D を行っている。コイルの平均電流密度を増加させるために、REBCO テープ線材を2枚バンドルさせ、コイル内の超伝導線材の割合を増やすことで、30T の磁場発生が可能となる。本研究では、線材を組み合わせでバンドルさせたコイルについて調べた。遮蔽電流を軽減する目的でバッファ層に機械的に溝を入れて 4 本にスクライブさせた線材とスクライブさせていない線材で作製した2種類のコイルについて、ゼロ磁場と 11T の磁場中において通電し、コイルのひずみ・温度変化・中心磁場を測定した。

2. 4フィラメント GdBCO テープ2枚重ね巻きコイル

今回、コイル及び使用した線材の緒元を表1に示す。コイルは GdBCO テープ線材の超伝導層を組み合わせるように組み合わせて巻線した(図 1(a))。スクライブ線は、フジクラで開発された、バッファ層に機械的にスリットを入れてその上に超伝導層などを積層させて4フィラメントの線材としたものである(図 1(b))[1][2]。

コイル中心にホール素子、コイル最表面にひずみゲージを配置した。コイルは銅フランジを介してクライオスタットに取り付け、12T 超伝導マグネット内に設置した。測定は 4.2K(LHe), 10 K, 20 K, 30 K, 40K の温度範囲、0 T, 11 T の磁場条件、電流の掃引速度を 0.33 A/s, 0.8 A/s, 1.9 A/s, 4.2 A/s, 8.3 A/s に変化させて測定した。

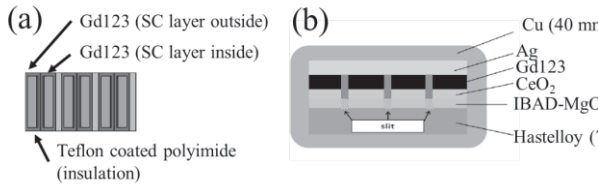


Fig. 1 (a) Cross-section image of a two tapes co-winding coil and (b) four-filaments GdBCO tape.

Table 1 Specifications of tapes and coils.

		Non-scribe	Scribe
Tape	Material	GdBCO w/o APC	
	I_c (77K) of Tape of filaments	A 175/182	214
	Tape width	mm 4.1	4
	Tape thickness	mm 0.17	
Coil	of tapes	2 (two-ply)	
	Inner dia.	mm 100	
	Outer dia.	mm \approx 185	
	Coil height	mm 4.5	
	of turns/pancake	107	
	Total tape length	m 96.6	
	Insul. Thickness	mm 0.06	
	Coil I_c @77K	A 172	207
	Coil n -value	33	15

3. 測定結果

図 2 は最外層におけるコイル電流とひずみの関係である。ひずみはコイル電流に対してほぼ線形な関係にあることがわかる。また、最大 850 A の電流を流したときのひずみは 0.2~0.25 %程であった。

図 3 は印加磁場 0 T, 11T でのスクライブしたコイルにおける遮蔽磁場のコイル電流依存性の一例を示したものである。この遮蔽磁場の振る舞いは通常の遮蔽磁場による影響とヒステリシスの向きが異なっており、バンドルによるテープの結合によるものと考えられる。

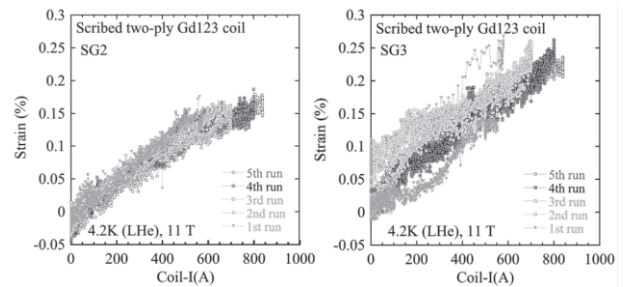


Fig. 2 Coil current dependence of strains on the coil outer surface.

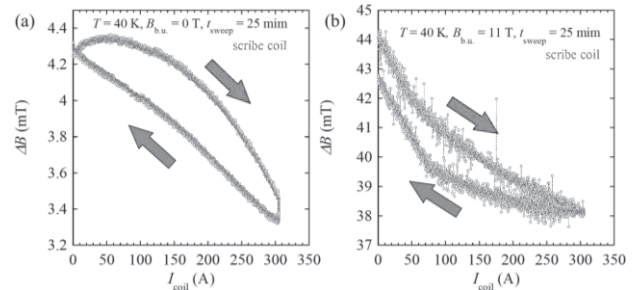


Fig. 4 Hysteresis of screening field under $B_{BG} = 0$ T (a) and $B_{BG} = 11$ T (b).

4. まとめ

30T 無冷媒超伝導マグネットの R&D として、4 本にスクライブした線材とスクライブしていない線材を用いたバンドルコイルについて、ゼロ磁場と 11T の磁場中において通電し、コイルのひずみ、温度変化、コイルの磁場を測定した。当日はスクライブの有無による遮蔽電流と交流損失の振る舞いの違いについてより詳細に報告する。

参考文献

1. S. Awaji, *et al.*, SuST, Vol. 30 (2017) 065001.
2. C. Kurihara, *et al.*, Physica C, Vol. 530 (2016) p.68.
3. S. Fujita, *et al.*, IEEE TAS, Vol. 27 (2017) 6600504.

SMES 用パンケーキコイルに用いる MgB₂ 撚り線導体設計とコイル安定性試験

Design Study of Twisted-Conductor Using MgB₂ Round Wires for SMES and Stability Demonstration of Prototype Pancake Coil.

水野 伸哉, 谷貝 剛, 大久保 徹, 水落 空, 上林 昌弘, 神保 茉那, 高尾 智明(上智大学); 平野 直樹(中部電力); 横田 康博, 新富 孝和(KEK); 駒込 敏弘, 塚田 謙一(前川製作所); 恩地 太紀, 荒井 有気, 石原 篤, 富田 優(鉄道総研); 濱島 高太郎(前川製作所)

MIZUNO Shinya, YAGAI Tsuyoshi, OKUBO Toru, MIZUOCHI Sora, KAMIBAYASHI Masahiro, JINBO Mana, TAKAO Tomoaki (Sophia Univ.); HIRANO Naoki(Chubu Electric Power Co. Inc.); MAKIDA Yasuhiro, SHINTOMI TAKAKAZU(KEK); KOMAGOME Toshihiro, TSUKADA Kenichi, (Mayekawa MFG Co. Ltd); ONJI Taiki, ARAI Yuki, ISHIHARA Atsushi, TOMITA Masaru(RTRI); HAMAJIMA Takataro (Mayekawa MFG Co. Ltd)
E-mail: s.mizuno1994@gmail.com

1. はじめに

今後、太陽光や風力といった不安定な再生可能エネルギーを利用の導入は必須であり、その際問題となる供給電圧の安定化の実証を目的に、SMES、燃料電池、電気分解装置から構成される ASPCS (Advanced Superconducting Power Conditioning System) を提案し、Bi線材を用いた SMES での動作実証を行ってきた[1][2]。現在、今後より経済的・高性能化が見込まれる MgB₂ 線材を用いた SMES 用積層ダブルパンケーキコイルの設計製作を計画している。これまで空間曲線の理論を適用した撚り線導体やコイル化における歪み解析に基づく設計を行ってきた[3]。本講演では、大容量撚り線導体を設計・製作し、本コイルの 1/2 のサイズの先行小型コイルを製作、特性試験と共にクエンチ保護の観点から重要なパラメータとなる常伝導伝播速度や MQE の測定を行った。

2. 大容量撚り線導体および先行コイル仕様

SMES コイルに用いダブルパンケーキコイルは、2通りの方法で製作する予定であり、一つは撚り線導体の熱処理後にコイル巻き線を行うリアクト&ワインド法(R&W 法)、もう一つは撚り線導体製作後に絶縁加工して巻き線し、コイル全体を熱処理するワインド&リアクト法(W&R 法)である。両手法を導入した理由は、MgB₂ 線材を用いて大型の SMES を構成する場合に、どの開発手法が適しているかを確認するためである。

まず W&R 法適用のコイル製作を目的に、Hyper Tech 社製 30-NM 素線を用いて導体設計を行い、先行小型コイル(外径 300mm、実コイルの 1/2 スケール)を製作した。導体断面模式図とコイルの写真を Fig. 1 に示す。素線仕様は 1.5 T で約 1250 A/mm² の電流密度を持つ直径 0.83 mm の未処理線であり、熱処理前の許容曲げ歪みは 4% である。これを 8 本、長方形断面に近い銅のフォーマーに撚りピッチ 51 mm で安定化のための 4 本の Cu 素線とともに撚り線し、厚み 0.1 mm の s-glass で絶縁した。導体はコイル厚み方向に 5.06 mm、径方向 2.86 mm の矩形断面導体である。先行小型コイルはこの導

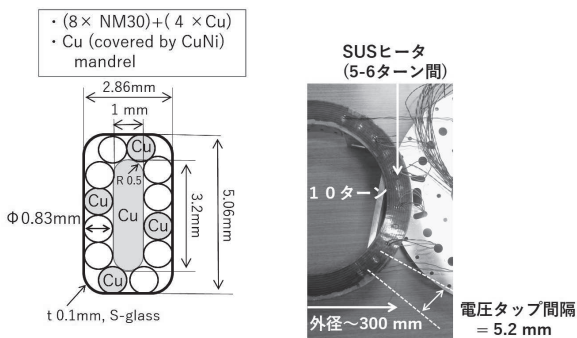


Fig.1 Illustration of the cross section of the conductor and picture of the test coil produced by W&R method.

体を 10 ターン巻いたシングルパンケーキコイル構成であり、装置の寸法制約で 270 mm 外径になるように製作され、熱処理を行った。

コイルには安定性試験用に、電極から最も遠い 5-6 層間に SUS のヒータ (0.33 Ω, 20 K) を挿入し、それを跨ぐように、導体長手方向等間隔に電圧タップ (タップ間距離 52 mm) が取り付けられ、径方向にも 4, 7 層目に設置されている。熱擾乱入力による常伝導部の発生電圧およびその伝播を観測する事ができるようにした。

3. 試験結果

コイルは冷凍機による伝導冷却で運転温度 20 K に設定され、外部磁場 1.5 T で I_c 測定を行った。ヒータに最も近い電圧タップから得られた結果を Fig. 2(a) に示す。コイル I_c は約 700 A という結果になり、30-NM 素線の銅比 12% から推測される電流値約 87 A の素線本数倍のコイル I_c 特性が得られている事を確認した。

Fig. 2(b) は安定性試験の結果である。コイルの負荷率を変え、最小クエンチエネルギー (MQE) の評価を行った。ヒータ電流が低く、パルス幅が長い場合、負荷率に反比例して MQE は大きくなったが、ヒータ電流が大きくパルス幅が短い場合、冷却の効果によって MQE に大きな変化がない事がわかる。冷却項を考慮した伝熱解析も含めた詳細は講演にて報告する。

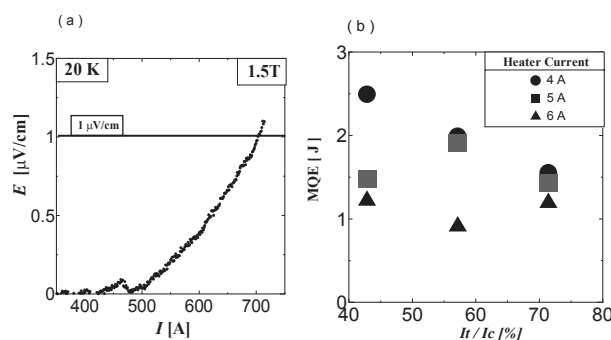


Fig.2 (a) E-J characteristic of the W&R test coil
(b) load factor dependence of Minimum Quench Energy.

5. 謝辞

本研究は、JST 先端的低炭素化技術開発事業(ALCA)の助成を受け、実施したものである。

参考文献

1. T.Hamajima, et al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 22, no. 3, ID. 5701704, 2012.
2. D. Miyagi, et al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond.* vol. 25, no. 3, ID. 5700305, 2015.
3. 谷貝他, 電気学会超電導研究会、ASC-017-01, 2017.

運転中の高温超伝導巻線に生じた異常の診断法 ～外部磁界印加中の測定～

Diagnosing method of abnormal conditions produced in the HTS windings under operation
-Measurements under external magnetic fields -

川越 明史 松元 拓磨, 細田 啓太, (鹿児島大学)

KAWAGOE Akifumi, MATSUMOTO Takuma, HOSODA Keita (Kagoshima University)

E-mail: kawagoe@eee.kagoshima-u.ac.jp

1. 背景

高温超伝導コイルを用いた電力機器の実用化のためには、巻線状態を常時監視し、その健全性を診断できるシステムが必要である。そこで我々は、ピックアップコイルを用いた異常診断システムを提案している[1]。応用の一例として、高温超伝導変圧器に本システムを適用し、測定信号から巻線の状態を診断する方法について検討を行っている[2]。本システムでは、巻線の交流損失特性に対応した電磁エネルギーの流れ（エネルギーフロー）を観測することによって、巻線の異常を検出し、また異常の程度を推定する。

変圧器などの実際の機器に本システムを適用するには、運転時に通電電流が変化する状態で、異常を検出・診断できる必要がある。我々は、巻線の交流損失特性に基づいて、エネルギーフローの測定値から巻線の臨界電流を推定することによって、巻線の異常の状態を診断することを検討している。そのためには、エネルギーフローの運転電流依存性を明らかにし、また巻線の状態とエネルギーフローの関係を定量的に明らかにする必要がある。これまでに1ターンの Bi2223 テープ線材と YBCO 線材の2種類のサンプルコイルにおいて、交流通電中の臨界電流の低下が推定できることを、実験的に示している[3]。今回は、1ターンの空芯コイルに外部磁界を印加した状態で測定を行った。

2. 本診断システムの概要

我々の提案する異常診断システムは、電界用ピックアップコイルと磁界用ピックアップコイルを用いて、局所電界・磁界を測定し、その外積からポインティングベクトルを求め、それを一周積分することによってエネルギーフローを観測する。

エネルギーフローは交流損失に起因するので、巻線に何らかの異常が生じて臨界電流が変化すると、交流損失特性の変化に伴ったエネルギーフローの変化が観測される。これにより異常を観測できる。

3. 実験

これまででは、サンプルに交流電流を通電して臨界電流の推定が可能かどうかを実験的に調べた。今回は、外部磁界印加用マグネット内に内挿デュワを挿入し、サンプルをその中にセットすることによってサンプルの温度を変えられるようにした。サンプルの温度は、内挿デュワ内の気圧を下げることで変化させた。

今回は、エネルギーフローの温度依存性を観測した。これにより、臨界電流とエネルギーフローが対応するかどうかを調べた。

Table 1. Parameters of the sample coil and the winding tape.

Coil	Column A (t)
Form	Ring form
Turn number	1
Diameter	70mm
Tape	
Filament material	Bi-2223
Size	4.2×0.22 mm ²
Critical current	115A

サンプルに使用した線材は、Table1 に示すように、Bi2223 多芯テープ線材で、77.3K、自己磁界中の臨界電流は 115A のものである。サンプルは、直径 70mm の1ターンのコイルとした。1mT～70mT までの磁界を、テープは幅広面に平行方向に印加し、周波数は 50Hz とした。温度は、67K、72K、77.3K とした。

4. 結果

測定したエネルギーフローの印加磁界依存性を Fig. 1 に示す。横軸は、印加磁界を中心到達磁界で規格化した規格化磁界で、縦軸は、測定されたエネルギーフローを B_p^2/μ_0 で規格化した規格化エネルギーフローである。 B_p は中心到達磁界で、規格化エネルギーフローがピーク値になるときに印加磁界が B_p になるように、フィッティングして求めた。その結果、 B_p は、77.3K、72K、67K で、それぞれ、33mT、43mT、51mT となった。それぞれの温度で測定されたエネルギーフローはよく重なっており、本システムで測定したエネルギーフローが交流損失と同様の特性を持っていることがわかる。なお、77.3K の時の臨界電流が 115A であるので、72K、67K では、それぞれ、150A、178A と推定できる。この値は、Bi2223 テープ線材の臨界電流特性としては、妥当な値と考えている。

5. まとめ

高温超伝導コイルの健全性を診断するシステムを開発するために、我々の提案するシステムで測定するエネルギーフローと巻線の臨界電流の関係について調べている。今回は、Bi-2223 多芯テープ線に外部磁界を印加してエネルギーフローを測定した。温度を変えて臨界電流が変化しても、エネルギーフローは交流損失特性と同様の磁界依存性を持っていることが確かめられた。この結果、外部磁界中でも本システムによって巻線の臨界電流を推定できる可能性があることが示された。

本研究の一部は、科研費基盤(C) 16K06232 の助成を受けて実施したものである。

参考文献

1. H. Hiwatashi, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 86 (2012) p. 132.
2. K. Sakemoto, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 92 (2015) p. 178.
3. K. Hosoda, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 94 (2017) p. 123

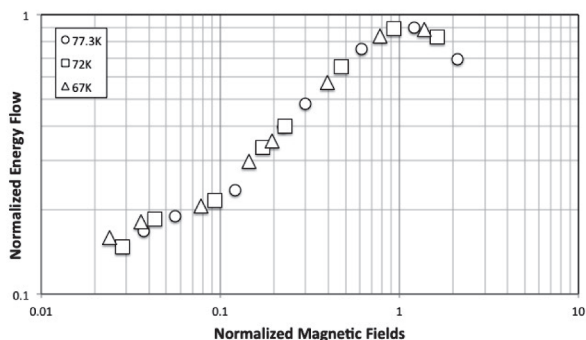


Fig.1 Magnetic fields dependence of Normalized energy flows

Multi-Stacked No-Insulation REBCO パンケーキコイルにおける熱的安定性の評価 Evaluation of Thermal Stability in Multi-Stacked No-Insulation REBCO Pancake Coil

市川 哲理, 矢代 聡佳, 鄭 齊一, 柿本 雄太, 石山 敦士(早稲田大学); 野口 聡(北海道大学);
渡部 智則, 長屋 重夫(中部電力);

ICHIKAWA Tetsuri, YASHIRO Satoka, Zheng Qiyi, KAKIMOTO Yuta, ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.);
NOGUCHI So (Hokkaido Univ.); WATANABE Tomonori, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power Co.,Inc)
E-mail: atsushi@waseda.jp

1. はじめに

無絶縁コイル(以下「NI コイル」)では、電流が常電導転移部を避けて隣接ターンへ転流し、ホットスポットの形成を抑制できることが示唆されている。これにより、従来の絶縁コイルで二律背反の関係にある高電流密度化と高熱的安定性を両立できる巻線方式として期待されている。今回は内径 60[mm]の小口径 NI ダブルパンケーキコイルを作製して 3 個スタックし、ヒーター入熱によって局所的常電導転移を模擬した実験を行い、電磁的および熱的振る舞いについて検討を行ったので報告する。

2. 実験方法

今回の実験で用いた試作 NI コイルと REBCO 線材の諸元を Table.1 に示す。また、試作 NI コイルの写真を Fig.1 に示す。ダブルパンケーキコイルの上段、巻線中央の 25 ターン目に抵抗値が 1000[Ω]のヒーター(歪ゲージ)を設置した。各コイルの中心にはホール素子が設置されている。

実験は液体窒素による浸漬冷却下で行い、スタックした各 NI コイル(DP1, DP2, DP3)は直列に接続して通電した。その様子を Fig.2 に示す。

3. 実験結果

Fig.3 にスタックした中央の DP2 のヒーターに 10 秒間入熱した場合の中心磁場の変化の様子を示す。横軸を時間、主軸を各コイルの中心磁場、第 2 軸をヒーターに投入した熱量とした。また、各 NI コイルの両端電圧を Fig.4 に示す。主軸を各コイルの電圧、第 2 軸をヒーターに投入した熱量とした。

DP2 の中心磁場は上下の NI コイルよりも大きく減衰している。これは NI コイル内で局所的常電導転移が発生した場合に転流によって周方向電流が減少し、径方向電流が増加する現象によるもので、先行研究[1-2]で示されている。DP2 の下段コイルおよび DP1, DP3 では、磁場の減少を妨げる誘導電流が発生していると考えられる。またヒーター入熱を止めると中心磁場の値は元に戻っているため、NI コイル内の電流分布が局所的常電導転移発生前に戻ったといえる。

本研究は科研費基盤研究 A(No. 26249036)によった。

Table.1 Specifications of NI REBCO Pancake coil

Parameters		Values
REBCO Conductor	Tape width (mm)	4.00
	Copper stabilizer thickness(μm)	20
	Tape Ic @77K, self-field (A)	>80
NI Coil	i.d; o.d (mm)	60;70
	Height (mm)	10.0
	Turn per pancake	50
	Number of DP	3
	Coil Ic @77K, self-field (A)	60

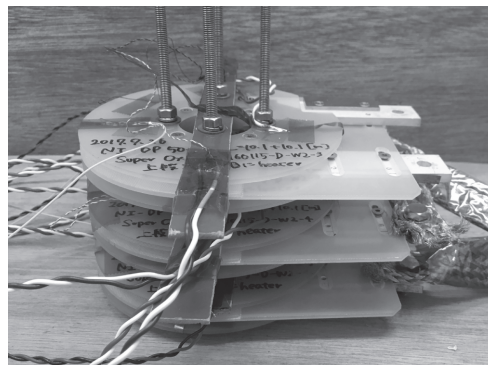


Fig.1 Picture of Multi-Stacked NI coil

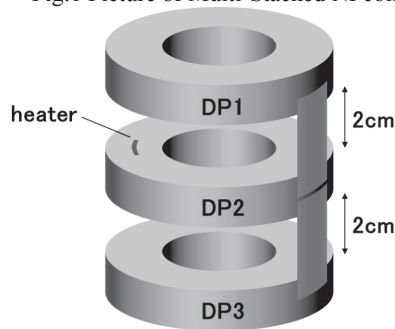


Fig.2 Schematic drawing of Multi-Stacked NI coil

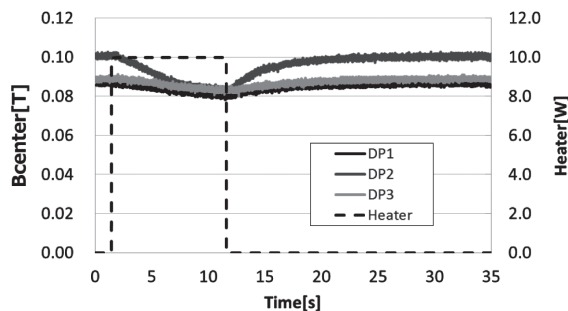


Fig.3 Magnetic field traces during a heater input

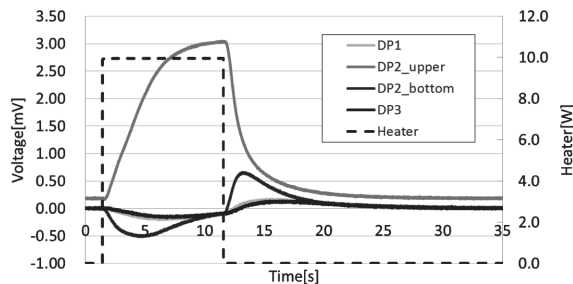


Fig.4 Voltage traces during a heater input

参考文献

1. K.Katsumata, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol.92 (2015) P.93
2. S.Yashiro, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol.93 (2016) P.12

無絶縁巻線技術に基づく積層型高温超電導コイルシステムの設計： メーター級大口徑 MRI への応用に伴う技術的課題と解決方策

Design of a Multi-Stacked HTS Pancake Coil-System based on No-Insulation Winding Technique: Technical Challenge and Solution during the Application of Meter-Class Bore MRI

王 韜(早稲田大学); 杜 双松, 丁 開忠(中国科学院)

WANG Tao (Waseda University); DU Shuang-song, DING Kaizhong (Chinese Academy of Sciences)

E-mail: michealwang@fuji.waseda.jp

1. はじめに

無絶縁高温超電導巻線技術(No-insulation コイル, 以下無絶縁コイル)は, 高温超電導コイルの高電流密度と高熱的安定性を同時に実現するコイル化技術として提案された[1]。これまで我々は, シングルパンケーキレベルの無絶縁コイルの成立性と有効性について, 数値解析および検証実験により色々な検討を行ってきた[2]。しかし, Fig.1(b)と(c)に示すように, 絶縁コイルで構成された積層型コイルシステムは, 励磁時の電流分流や逆流を防止するために, 保護抵抗がダイオードと直列することが常識とされていた。一方, 無絶縁コイルは層間接触のため, 励磁時に電流が分流されていくことを妨げない。特に, 積層型無絶縁コイルシステムはインダクタンスの大きいメーター級 MRI に応用されると, 励磁ができなく, マグネットとして機能する役割が果たせなくなる可能性がある。そこで, 無絶縁コイルの優秀な特性をメーター級大口徑 MRI で十分発揮するためには, 様々実用性課題を解決し, 高信頼性を実現することが重要な課題となる。本報では, 先行研究で取り上げた 3-T メーター級大口徑 MRI に応用する積層型無絶縁コイルシステムを例として, 無絶縁巻線技術が実用される時に直面する技術的課題および解決方策について報告する。

2. 技術的課題および解決方策

Table. 1 に従来の積層型絶縁高温超電導コイルシステムと無絶縁高温超電導コイルシステムの特性比較をまとめた。ここで, 無絶縁高温超電導コイルシステムは絶縁コイルシステムとほぼ正反対の特性を持つことを示す[3, 4]。しかし, 安定性と信頼性の面で, 無絶縁コイルシステムは従来の絶縁コイルシステムに決して代替されない特性が多いとわかった[3, 4]。従って, メーター級大口徑 MRI への応用を向ける高安定性・高信頼性高温超電導マグネットの設計には, 無絶縁コイルの高熱的安定性を活かしながら, 充放電時の遅れ, 電流バイパスおよび発熱を許容範囲内に抑制することが目標となる。その目標を実現するために, 様々な技術課題が直面されている。まず, 無絶縁コイルシステムの設計用プログラムおよび特性評価用プログラムの開発は重要である。その課題に対して我々はこれまで開発された「field-circuit coupled FE analysis」というアプローチを具体的な需要に応じる改良を行った。設計時においては簡易等価回路を導入, 温度特性評価時においては熱計算を重視するメッシュを導入することにより, 解析容量と負荷を減らし設計効率を向上することに成功した(連番発表を参照)。次に, 高インダクタンス無絶縁コイルシステムの励磁不能という技術的課題に対して解決方策を作るべきである。それに対して, 我々は開発された解析プログラムを用いて, 無絶縁コイルシステムの励磁時における子コイルの電流の振る舞いを解明し, そしてその電流の振る舞いを影響する要素を抽出した。また, メーター級大口徑 MRI 用マグネットへ適用することに目指し, 無絶縁コイルシステムが励磁可能となる条件, すなわち, 自己インダクタンスと接触抵抗の比について数値解析で計算した。最後に, メーター級大口徑 MRI 用無絶縁コイルシステムの励磁時における発熱を評価し, 各子コイルに必要な冷却負荷について検討した。以上の詳細結果について, 学会当日に発表する。

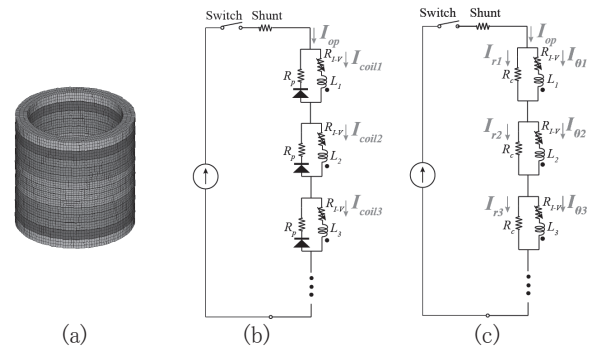


Fig.1 Comparison of Equivalent Circuits of Multi-Stacked HTS Pancake Coil-System: (a) Scheme of Multi-Stacked Coil-System; (b) Insulation Coil-System; (c) No-Insulation Coil-System

Table.1 Comparison of Advantages and Limitations between Multi-Stacked Insulation and No-Insulation Coil-Systems

	長所	短所
積層型絶縁コイルシステム	<ul style="list-style-type: none"> ◎充放電が敏速 ○Ramping Loss が少 ○静磁場条件での安定化マージンが高い ○設計ハードルが低 ◎含浸しやすい 	<ul style="list-style-type: none"> ×熱暴走し易い △外部保護抵抗が必要 ×常伝導転移速率が遅いため検出が困難
積層型無絶縁コイルシステム	<ul style="list-style-type: none"> ◎熱暴走ほほしない ◎外部保護抵抗が不要 ◎静磁場条件での安定化マージンが非常に高い ◎常伝導転移時に転流による磁場擾乱が発生するため検出し易い 	<ul style="list-style-type: none"> ×充放電に遅れが出る ×Ramping Loss が高 ×層間接触抵抗率を制御不能 ×設計ハードルが高 ×含浸すると層間接触特性が変わる可能性がある

本研究は, 日本文部科学省科学研究費若手研究 B (16K18068)のご支援の下, 行ったものとする。

参考文献

- 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, Jun. 2011.
- T. Wang, et al.: "Analysis on Transient Behaviors of No-Insulation REBCO Pancake Coil during Over-Current and Sudden Discharging", IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 25, No. 3, Art. No. 4603409, 2015
- S. Hahn, et al., "No-Insulation (NI) HTS Inserts for >1 GHz LTS/HTS NMR Magnets," IEEE Trans on Appl. Supercond., Vol. 22, No. 3, 2012
- J.B.Song, et al., "Over-Current Quench Test and Self-Protecting Behavior of a 7 T/78 mm Multi-Width No-Insulation REBCO Magnet at 4.2 K," Supercond. Sci. and Tech., Vol. 28, No. 11, 2015

複数の特性劣化部分を有する無絶縁 REBCO パンケーキコイルの特性評価

Evaluation on Behavior of No-Insulation REBCO Pancake Coil with Multiple Defects

柿本 雄太, 矢代 聡佳, 鄭 齊一, 市川 哲理, 石山 敦士(早大);野口 聡(北大)

KAKIMOTO Yuta, YASHIRO Satoka, ZHENG Qiyi, ICHIKAWA Tetsuri, ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.);

NOGUCHI So(Hokkaido Univ.)

E-mail: atsushi@waseda.jp

1. はじめに

我々は、医療用加速器や高磁場 MRI をターゲットとした高温超電導システムの開発を目指している[1]。より高い磁場を発生させるためには、安定して高い I_c を持つ超電導線で作製する必要がある。しかし、それにはかなりのコストがかかってしまう。そこで、最近の研究では無絶縁コイル(NI コイル)において、 I_c 劣化を有する超電導線で作製する(DIW)技術が提案・検討されている[2]。今回は複数の I_c 劣化部分を有する無絶縁パンケーキコイル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ったのでその結果を報告する。

2. 解析方法

解析で用いたコイルの諸元を Table.1 に示す。解析は Fig.1 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った[1]。今回は先行研究で行われた実験で用いられた REBCO パンケーキコイルを再現し、熱暴走に至るまでの振る舞いを解析により評価した[2]。通電電流上昇率は $1A/s$ である。用いられた REBCO 線材の長手方向の I_c 分布を Fig.2 に示す。また、コイル熱容量は線材を銅安定化層と Hastelloy 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 LN_2 冷却として行った。解析は NI コイルと絶縁コイルの両方について行い、比較・検討を行った。

3. 解析結果

結果を Fig.3 に示す。この図は、NI コイルと絶縁コイルの $1A/s$ で通電電流を上げた時の端子電圧の変化を表している。NI コイルの結果を見ると変曲点がいくつか見られる。これは REBCO 線材内に I_c のばらつきがあるためであり、まず最初に発生した $30A$ 付近の変曲点は、最も I_c が低い部分(18m 付近)によるものだと考えられる。部分的に I_c が $30A$ ほどになっているので、一瞬電圧が上がるが NI コイルの特性により、隣接ターンに電流が流れるため、コイル全体では熱暴走せずに運転することができる。このほかに 4 つの変曲点があり、それだけ I_c のばらつき部分があることを表している。結果として I_c ($1 \mu V/cm$ 基準)は $58.45A$ となった(劣化がない場合は $I_c=58.9A$)。また、絶縁コイルの結果を見ると、NI コイルの最初の変曲点で熱暴走していることがわかる。このときの I_c は $26.1A$ となった。

このように、NI コイルは I_c のばらつきが存在しても、絶縁コイルよりも熱暴走しにくいということがわかった。今後は、DIW 技術を用いたコイルについて、より低温で大電流の場合などの解析を行っていく予定である。

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] S. Hahn, et al., "Defect-irrelevant' behavior of a no-insulation pancake coil wound with REBCO tapes containing multiple defects" SUPERCONDUCTOR SCIENCE & TECHNOLOGY, vol 29, issue 10, 2016

表 1 無絶縁 REBCO パンケーキコイルの諸元

Table.1 Specification of No-Insulation REBCO pancake coil

	Overall width; thickness[mm]	4.02; 0.09
REBCO conductor	Copper stabilizer thickness[μm /side]	20
	I_c @ 77K, self-field[A]	> 115
	i.d ; o.d [m]	0.400; 0.645
Coil	Height[mm]	4.02
	Turns	135
	I_c @ 77K(healthy coil)[A]	58.9
	Inductance[mH]	1.266
	Turn-to-turn contact resistivity	70
	R_{ct} [$\mu\Omega \cdot cm^2$]	70

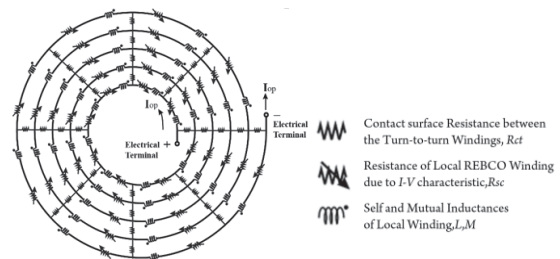


図 1 PEEC モデル

Fig.1 Partial Element Equivalent Circuit Model

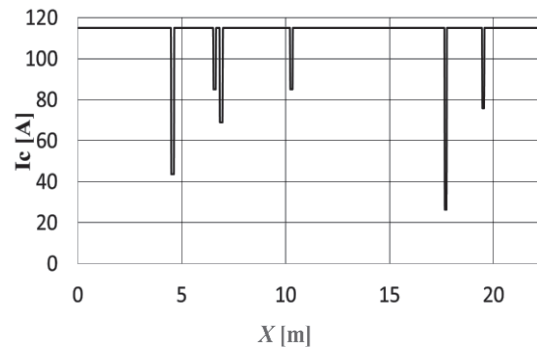


図 2 REBCO 線材の長手方向の I_c 分布

Fig.2 I_c Distribution in Lengthwise Direction in REBCO Tape

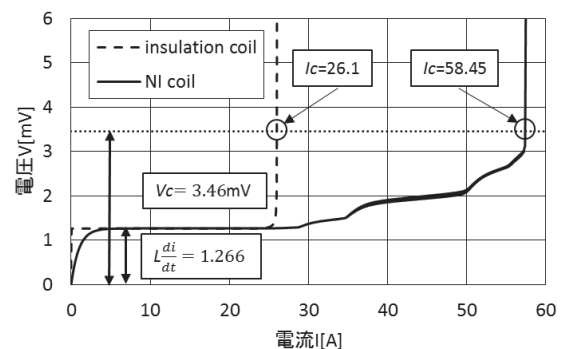


図 3 解析結果

Fig.3 Analytical Result

局所的 I_c 低下が REBCO コイルのクエンチ特性に及ぼす影響

Influence of Local I_c Degradation on Quench Characteristics of a REBCO Coil

井出 桃愛, 宮城 大輔, 津田 理 (東北大学); 横山 彰一 (三菱電機)
 IDE Momoe, MIYAGI Daisuke, TSUDA Makoto (Tohoku Univ.);
 YOKOYAMA Shoichi (Mitsubishi Electric Corp.)
 E-mail: momoe.ide.p4@dc.tohoku.ac.jp

1. はじめに

REBCO コイルは、熱拡散速度が非常に遅いため、局所的な常電導転移によりコイルが損傷する可能性がある[1]。この局所的な常電導転移の原因の一つとして、局所的な超電導特性の低下が考えられている。そこで、本研究では、REBCO コイルにおける局所的臨界電流 (I_c) 低下に着目し、線材の一部を切断することで局所的な I_c 低下を模擬したコイルを作製して、 I_c の低下量、コイルの冷却効果が、コイルのクエンチ特性に及ぼす影響について検討した。

2. 実験方法

局所的 I_c 低下に対して、線材の冷却効果や線材間の伝熱効果がクエンチ特性に及ぼす影響を調べるために、GdBCO 線材の一部を切断した短尺試料とコイルを作製し、液体窒素冷却した場合のクエンチ特性を評価した。なお、切断箇所は各サンプルの中央とした。実験に用いた試料は、全長 100 mm の短尺試料と、全長 1450 mm、内径 90 mm のコイルである。実験に使用した GdBCO コイルの諸元を Table 1 に示す。

実験では、短尺試料とコイルにおいて、 I_c 低下部を styrofoam で覆ったもの(以降、styrofoam 冷却)と、覆わないもの(以降、LN₂ 冷却)を用意した。そして、一定電流を通電した際の発熱量を、測定した両端電圧値と電流値から算出した。試料への通電は、0 A から一定速度(5 A/s)で増加させ、目標電流到達後に電流を 60 s ホールドしてから、0 A まで減少させた。この様な通電を、目標電流を少しずつ増加させながら繰り返し、熱暴走が生じて焼損するまで行った。そして、各サンプルにおいて、安定して通電を継続できる最大許容発熱量(以降、許容発熱量)を算出した。

3. 実験結果と考察

まず、各切断長に対する臨界電流値と断線(焼損)電流値を測定した。その結果を Fig.1 に示す。臨界電流値(実線)は、短尺試料、コイルともに、切断長に比例して減少した。また、断線(焼損)電流値(点線)は、試料形状や冷却条件に大きく依存することが確認された。次に、各サンプルで安定して通電を継続できる許容発熱量を測定した。切断長 3 mm の場合の測定結果を Fig.2 に示す。styrofoam 冷却の場合、単線の許容発熱量が 0.007 W であったのに対し、コイルの許容発熱量は 0.09 W であった。単線の場合は、切断部付近で発生した熱が線材長手方向のみに伝導するものの、コイルの場合は、線材長手方向だけでなく層間方向にも熱が移動する。このため、styrofoam 冷却時の単線とコイルの許容発熱量の差(0.083 W)は、層間方向の伝熱効果に起因していると考えられる。また、コイルの冷却効果については、styrofoam 冷却時の許容発熱量が 0.09 W であったのに対して、LN₂ 冷却時の許容発熱量は 0.58 W と、約 0.5 W 増加した。この差は、液体窒素によるコイル上面からの冷却効果に起因していると考えられる。また、本実験により、コイル上面からの冷却効果が、層間の伝熱効果よりも、非常に大きいことがわかった。コイルの許容発熱量が大きい場合ほど、クエンチ発生時のコイル両端電圧が大きかったことから、コイル保護のためのクエンチ検出を容易にするには、コイル上下面からの冷却効果を、少しでも改善することが有効であると考えられる。

Table 1 Specifications of a GdBCO Coil

Shape of coil	Single pancake coil
Wire length [m]	1.45
Inner diameter [mm]	90
Number of turns	5
Critical current(77 K, 1 μ V/cm) [A]	192

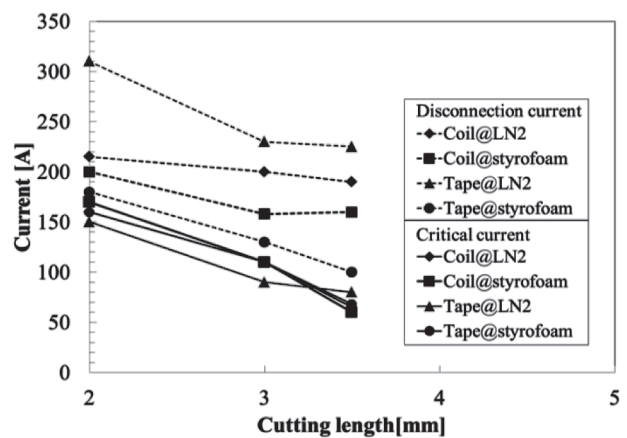


Fig.1 Critical current and disconnection current as a function of cutting length

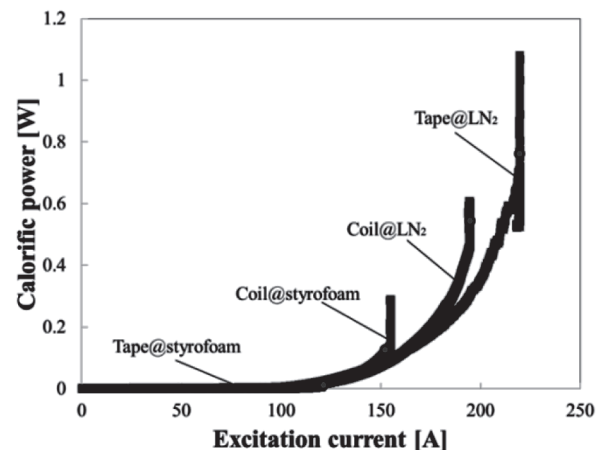


Fig.2 Calorific power as a function of operating current when the target current was equal to the maximum target current that could maintain the superconducting state for 60s at the target current (The maximum allowable calorific power is expressed as a plot).

謝辞

本研究は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 「高温超電導実用化促進技術/高温超電導高安定磁場マグネットシステム技術開発(コイル開発)」により委託・支援を受け実施したものである。

参考文献

1. A. Ishiyama et al., J. Cryo. Super. Soc. Jpn., 48, pp.141-150 (2013)

高温超電導コイルの熱暴走と線の最小伝搬領域

Thermal runaway of HTS coil and minimum propagation zone of HTS tape

小島 あかね, 松尾 竜太, 鳥山 飛史, 松田 直大, 澁田 佳稀, 野本 堯宏, 高尾 智明, 中村 一也, 塚本 修巳 (上智大学)

KOJIMA Akane, MATSUO Ryuta, TORIYAMA Hifumi, MATSUDA Naohiro, FUCHIDA Yoshiki, NOMOTO Akihiro,

TAKAO Tomoaki, NAKAMURA Kazuya, TSUKAMOTO Osami (Sophia Univ.)

E-mail: a-kojima-we8@eagle.sophia.ac.jp

1. はじめに

HTS コイルがクエンチを起こす主原因は線材の欠陥によるものと考えられる。クエンチが生じると急激な温度上昇による熱暴走・コイル損傷に至る可能性がある。

本稿は抵抗領域が発生しても熱暴走に至らないための条件について検討を行うことを目的としている。コイルの運転を継続しても抵抗領域が広がらず、クエンチに至らない最小の伝搬領域(Minimum propagation zone : MPZ)および MPZ における発生する抵抗電圧をシミュレーションにより求め、MPZ と熱暴走との関係について考察し、熱暴走を起こさない条件について検討する。

2. 解析モデル

Fig. 1 に解析モデルを示す。カプトンテープにより電気的に絶縁された Bi 線を平行に並べ、パンケーキ巻コイルの一部を模擬したモデルとなっている。図 1 に示すように、線に他の部分と比べ臨界電流 I_c の低い劣化部があると、劣化部の I_c 劣化率 η は式(1)で表せるとする。ただし、 I_{c0} は 77 K 自己磁場下における線材の I_c 、 I_{cd} は劣化部の 77 K 自己磁場下における I_c とする。

$$\eta = \frac{I_{c0} - I_{cd}}{I_{c0}} \quad (1)$$

また、このモデルにおける熱平衡方程式を以下に示す。

$$C_p \frac{\partial T_i(x, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left(K \frac{\partial T_i(x, t)}{\partial x} \right) + P_i(x, t) - h_l(2T_i - T_{i-1} - T_{i+1}) - h_b(T_i(x, t) - T_{CB}) \quad (2)$$

C_p は線単位長さ当たりの熱容量、 $T_i(x, t)$ は第 i 層における温度、 T_{CB} は運転温度、 K は線材単位長さ当たりの熱伝導率、 h_l 及び h_b はそれぞれ層間、冷却底面への熱伝導係数である。また、 $P_i(x, t)$ は第 i 層におけるジュール熱を表す[1]。層方向及び冷却板との間の熱伝達率は実験値を用いている[2]。このモデルにおいて劣化部の長さ l_d 及び劣化率 η を変化させて解析を行った。

3. 解析結果

Fig. 2 に通電電流 250 A、冷却温度 $T_0 = 32$ K とした場合の劣化部の最高温度の時間変化の一例を示す。 $l_d = 2.00$ cm では一定時間が経過した後、常伝導部での発熱量と冷却底面への熱伝達がつり合い、温度は一定となりクエンチを起こさなかった。一方 $l_d = 2.01$ cm の場合、発熱量が上回り、クエンチを起こし熱暴走を起こした。以上のことから $l_d = 2.00 \sim 2.01$ cm の時に MPZ が生じることになる。

4. 最小伝搬領域(MPZ)に発生する電圧

各冷却温度における劣化率 η と MPZ で発生する抵抗電圧 V_{MPZ} との関係を図 3 に示す。コイルに発生する抵抗電圧が Fig. 3 に示す V_{MPZ} の値よりも小さい場合、クエンチ・熱暴走は生じない。

また MPZ よりも長い欠陥が生じた場合、常伝導部に発生する抵抗電圧は V_{MPZ} を超える。したがってクエンチ検出電圧を図 3 に示す値よりも小さく設定すれば、コイルの熱暴走を防

ぐことができる。

5. まとめ

以上の解析より、コイルに発生する抵抗電圧が V_{MPZ} を越えたら、コイルの蓄積エネルギーを放出することにより熱暴走を防ぐことができると考えられる。

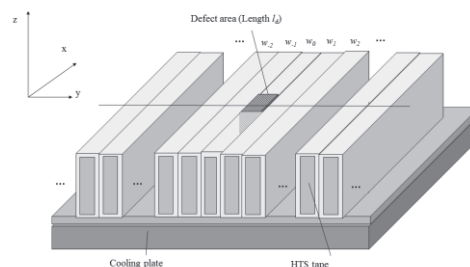


Fig. 1. Analytical model of winding pack of HTS coil for numerical simulation.

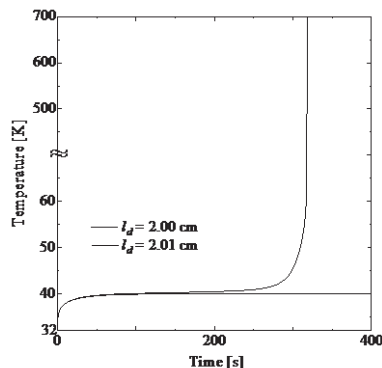


Fig. 2. Example of time evolution of temperature at defect area.

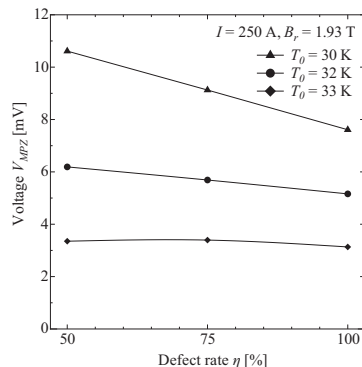


Fig. 3. Analytically obtained graphs of η vs. voltage V_{MPZ} for $T_0 = 30, 32, 35$ K.

参考文献

- [1] E. Sasaki, et al. : *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 26, No. 4(2016) 4701404
- [2] T. Ariyama, et al. : *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 27, No. 4(2017), 8800106