

先進超電導電力変換システム用 MgB₂ 100 MJ SMES トロイダルコイルの概念設計

Conceptual Design of MgB₂ toroidal coil for the 100 MJ SMES of ASPCS

後村 直紀, 高橋 利典, 天田 博仁, 岩崎 辰哉, 孫 敬雨, 宮城 大輔, 津田 理, 濱島 高太郎 (東北大);
新富 孝和 (日大); 榎田 康博 (KEK); 高尾 智明 (上智大); 宗像 浩平, 梶原 昌高 (岩谷産業)

ATOMURA Naoki, TAKAHASHI Toshinori, AMATA Hiroto, IWASAKI Tatsuya, SON Kyoungwoo,
MIYAGI Daisuke, TSUDA Makoto, HAMAJIMA Takataro (Tohoku University);

SHINTOMI Takakazu (Nihon University); MAKIDA Yasuhiro (High Energy Accelerator Research Organization);

TAKAO Tomoaki (Sophia University); MUNAKATA Kohe, KAJIWARA Masataka (IWATANI Corporation)

E-mail: a.naoki@ecei.tohoku.ac.jp

1. はじめに

低炭素社会構築のために、我々は液体水素ステーション、SMES、燃料電池、電気分解装置および再生可能エネルギーで構成した先進超電導電力変換システム(ASPCS)を提案している。その際、沸騰温度 20.3 K の液体水素の冷熱を用いることで SMES 用超電導体として MgB₂ 複合導体の使用が可能となる。これまでに、5 MW クラス自然エネルギー ASPCS システムにおいて、定格出力 1MW の SMES 容量は約 100 MJ で過不足なく充放電可能になることがわかっている[1]が、MgB₂ 大容量コイルの設計例は少ない。そこで、液体水素間接冷却方式の ASPCS 用 SMES トロイダルコイルの概念設計を行ったので報告する。

2. MgB₂ 導体諸元およびコイル基本仕様

コイル使用導体は、Hyper Tech 社製 $\phi 0.84$ mm の MgB₂ (18SC+1Cu multifilament) 導体を想定した[2]。臨界電流密度は、液体水素温度 20 K、2 T の条件下で $J_c=20,000$ A/cm²、 $J_c=11,000$ A/cm² である。SMES コイルは、漏洩磁場の低減を目的として最大磁場 2 T のトロイダルコイル配置とした。ここで、コイル通電電流を線電流近似した場合、アンペア・メートル (IM) を最小にするコイル形状は、トロイダル主半径 3.68 m、要素コイル半径 2.21 m で $IM=203.9 \times 10^6$ A·m である。

3. 複合導体設計結果

ASPCS 用の超電導コイルは液体水素間接冷却での運転を想定しているため、各導体の巻線部は、絶縁物を介した上で熱抵抗が極力小さくなるように冷却板と接触させるのが好ましい。接触面の一様性の観点から、複合導体の形状として CIC 導体を採用した。導体構成を検討するに当たり、①発生最大応力が許容応力以下、②安定性マージンが 1 J/cc 以上となる臨界電流マージン、③クエンチエネルギー回収時の最高到達温度 130 K かつ保護開始電流値が設定運転電流値以上の 3 つの条件を定めた。コイル運転条件並びに設計により得られた CIC 導体の構成図を Fig. 1 に、パラメータを Table 1 に示す。安定化の為に 1 次サブケーブル中心に銅を配置した。

4. トロイダルコイル電磁界解析結果

上で得た CIC 導体を線間絶縁し、複数枚のダブルパンケーク(DP)コイル間を冷却用アルミニウム板で接触させた要素コイルを形成する。この要素コイルを多数配置したトロイダルコイルを対象に、設計仕様を満たすまで電磁界解析を行った。得た結果を Fig. 2 と Table 2 に示す。コイルサイズは約 $11.9 \times 11.9 \times 4.6$ m³ と、比較的大型になることがわかる。これは現在の MgB₂ 導体の Jc-B 特性から、最大磁場を 2 T と小さく設定したことが起因している。5 年後の開発目標値である $J_c=11,000$ A/cm²@(20 K, 5 T) とすると、コイルサイズは約 $6.4 \times 6.4 \times 2.4$ m³ とコンパクトになる。今回の概念設計により、現用の MgB₂ 導体での大容量コイル製造にはコイルサイズに課題があるが、今後の材料開発における Jc-B 特性向上へのひとつの指針が得られたと言える。

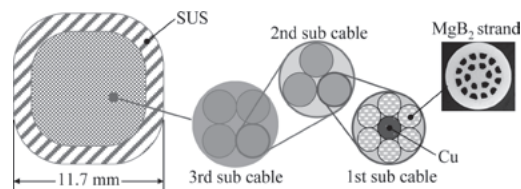


Fig. 1 Composition of CIC conductor.

Table.1 Operating condition and parameters of CIC conductor.

Constant output power	1 MW
Operating temperature	20 K
Maximum current	4 kA
Critical current	8 kA
Number of strand	72
Void fraction	(6SC+1Cu)×3×4
Maximum voltage	0.35
Size of CIC conductor	2 kV
Stability margin	11.7×11.7 mm ²
	1.128 J/cc

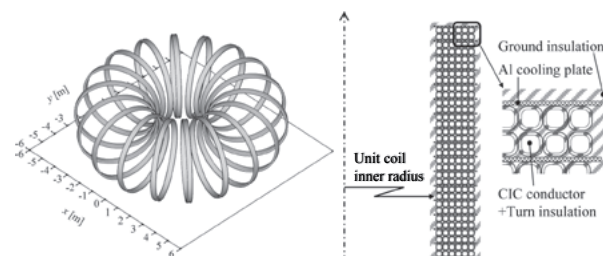


Fig. 2 Conceptual diagram of toroidal coil and unit coil.

Table.2 Parameters of toroidal coil.

Stored energy	100.4 MJ
Maximum field	2.0 T
Inductance	12.55 H
Number of unit coils	18
Toroidal major radius	3.68 m
Unit coil inner radius	2.21 m
Unit coil width	0.41 m
Number of turns per unit coil (SP coil×layer)	192 (32×6)
CIC conductor length	48.71 km
Distance from origin to 5 gauss line	8.25 m

謝辞: 本研究はJST戦略的創造研究推進事業(先端的低炭素化技術開発)の支援を受けた。

参考文献

1. T. Hamajima, et al.: "Application of SMES and fuel cell system combined with hydrogen vehicle station to renewable energy control" 3EP2-4 presented in MT-22.
2. M. Tomsic, et al.: Int. J. Appl. Ceram. Technol., 4 [3] (2007) 250-259

へき開力による YBCO コイルの特性劣化とその抑制法

Effect of cleavage stress on the YBCO-coated conductor coil performance and remedies for the effect

柳澤 吉紀, 朴 任中, 佐藤 耕太, 中込 秀樹(千葉大); 竹松 卓也, 高尾 智明(上智大);
上林 裕之(三菱電線工業); 高橋 雅人, 前田 秀明(理研, 横浜市大)

YANAGISAWA Yoshinori, PIAO Renzhong, SATO Kota, NAKAGOME Hideki (Chiba Univ.);
KAMIBAYASHI Hiroyuki (MITSUBISHI CABLE INDUSTRIES); TAKEMATSU Takuya, TAKAO Tomoaki (Sophia Univ.);
TAKAHASHI Masato, MAEDA Hideaki (RIKEN, Yokohama City Univ.)
E-mail: y_yanagisawa@graduate.chiba-u.jp

1. はじめに

YBCO コイルはエポキシ含浸により通電特性が劣化することがある[1]。この種の劣化の本質的な原因は、線材の強度がエポキシの強度に負けることで起こる線材剥離である。我々は去年の学会で、エポキシ硬化時やコイル冷却時に線材に生じる径方向引っ張り応力[1]や、へき開応力[2]が線材剥離を起こし、コイル特性が劣化する可能性を報告してきた。本報では、この種の剥離と劣化を防ぐ方法として、電着技術を用いてポリイミドで被覆した YBCO 線材を製作し、これで巻いたコイルにおけるエポキシ含浸の効果を議論した。

2. 実験方法

銅メッキされた YBCO 線材 (SuperPower 社製 SCS4050) を、電着技術を用いてポリイミドで被覆した。電着は、負に帯電させた樹脂微粒子を、正に帯電させた線材にプレーティングする手法である。この線材を用いて非含浸でダブルパンケーキコイル (巻線内径: 30 mm, 巻線外径: 37.5 mm, 巻線高さ: 9.4 mm) を製作した。巻き枠には厚み 3 mm の FRP 円筒を用いた。このコイルを液体窒素中で通電し、電圧-電流 (V-I) 特性を測定した。その後、コイルをエポキシ樹脂 (Emerson&Cuming, Stycast®1266) で含浸・硬化させた後、再度液体窒素中で通電し、V-I 特性を測定した。

3. 実験結果

Fig. 1 にポリイミドで被覆した YBCO 線材端部の断面を示す。YBCO 線材のような平角線の場合、従来のディッピングと焼き付けを繰り返す手法では、角の部分の被覆が十分行えない。一方、ここで用いた電着では線材の角部分に電界集中が起きるため、角の部分も含め十分な被覆が施されている。

Fig 2 にコイルの V-I 特性を示す。非含浸の場合 (白抜き丸印: ○)、50 A において常伝導電圧が立ち上がり始め、1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ に対応する臨界電流は 65 A である。V-I 曲線から求められる n 値は 20 である。このコイルをエポキシ含浸した後でも (白抜き三角印: △)、臨界電流と n 値共に変化はなく、特性劣化は起こっていない。

4. 考察

通常、エポキシ含浸した YBCO コイルにおいては、線材に径方向引っ張り応力やへき開力が印加されることで、線材剥離が起き、通電特性が劣化する。一方、パラフィンなどソフトポリマーで含浸した場合には[1]、径方向引っ張り応力やへき開力が生じて、層間のパラフィンが破断するので線材剥離が起らない。すなわち、線材とエポキシが直接接着せず、これらの応力が抑制されるコイル構成であれば、エポキシ含浸による劣化を防ぐことが可能である。

本実験で製作したポリイミド被覆線材は線材の角部分も含め、十分な被覆が施されているため (Fig. 1 参照)、エポキシが線材に直接接着しない。また、使用したポリイミドは、ポリマーの架橋率が比較的低いため被覆強度が比較的低い。さらに、含有するシリコンの効果で、被覆表面のエポキシ親和性が比較的低い。これらの被覆特性によって、エポキシと線材の間に伝わる力が緩和され、線材が保護されると考えられる。すなわち、被覆の破断 (Fig. 3(a)参照) や、被覆とエポキシの間の界面剥離 (Fig. 3(b)参照) によって、線材に生じるへき開力などの応力が緩和され、線材剥離が防がれると推察される。

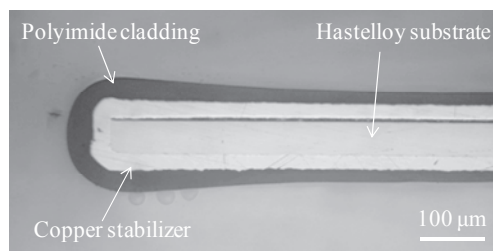


Fig. 1 Cross section of a polyimide-clad YBCO-coated conductor.

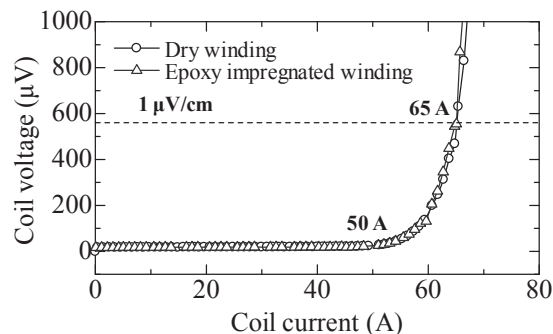


Fig. 2 Voltage-current curves for a double pancake coil wound with a polyimide-clad YBCO-coated conductor. Open circle and open triangle show the curve for dry winding and the curve for the epoxy impregnated winding, respectively.

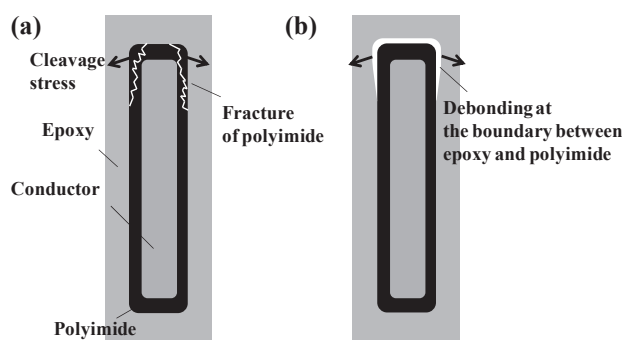


Fig. 3 Schematics of cross section of YBCO-coated conductor under cleavage stress. (a) Fractures of polyimide cladding. (b) Debonding between epoxy and polyimide cladding.

5. まとめ

YBCO 線材を比較的低強度の低いポリマーで被覆することで、エポキシ含浸によるコイル特性の劣化を防止できる。

参考文献

1. T. Takematsu, et al.: Physica C, 470 (2010) pp.674-677
2. Y. Yanagisawa, et al.: Physica C, 471 (2011) pp.480-485

YBCO コイルにおける劣化部位が引き起こすクエンチ特性

Effect of degradation on quench characteristics for YBCO-coated conductor coils

竹松 卓也, 高尾 智明(上智大); 柳澤 吉紀, 奥山 絵里加, 中込 秀樹(千葉大); 濱田 衛(JASTEC);
松本 真治, 木吉 司(NIMS); 滝沢 杏奈(横浜市大); 高橋 雅人, 前田 秀明(理研, 横浜市大)

TAKEMATSU Takuya, TAKAO Tomoaki (Sophia Univ.); YANAGISAWA Yoshinori, OKUYAMA Erika,
NAKAGOME Hideki (Chiba Univ.); HAMADA Mamoru (JASTEC); MATSUMOTO Shinji, KIYOSHI Tsukasa (NIMS);
TAKIZAWA Anna (Yokohama City Univ.); TAKAHASHI Masato, MAEDA Hideaki (RIKEN, Yokohama City Univ.)

E-mail: takematsu@ssbc.riken.jp

1. はじめに

YBCO 線材は長手方向に対して高強度(>700MPa)かつ、高磁場下で高電流密度のため、従来の超伝導線材と比べて高い電流密度でコンパクトな磁石設計が可能になる。しかし、YBCO コイルはエポキシ含浸や[1]、線材のハンドリングの不具合によって容易に通電特性が劣化してしまう。これらの劣化コイルでは、初めに緩やかな常伝導電圧を示し、最終的に熱暴走による急峻なデイクオフ電圧が生じる。この結果、コイルが溶断することさえある[2]。これらの現象について、これまで系統的に研究した例はほとんどない。本報では、この現象を77 K における実験により更に精密に検討し、クエンチによる劣化の進行・クエンチ電流の変化について調べた。さらに数値計算によって4.2 K におけるクエンチ特性を議論した。

2. 実験方法

YBCO 線材(SuperPower 社製 SCS4050)を用いて、5 ターンのシングルバンケーキコイルを製作した。コイルは内径 30 mm, 外径 31.8 mm であり、層間絶縁には厚さ 35 μ m のカプトンテープを使用した。コイル臨界電流は98 A である。コイルの各層に電圧タップを取り付け、3 層目及び4 層目には T 型熱電対を接着した。3 層目の中央付近の線材を $\phi=8$ mm の円筒状の棒に巻きつけることで意図的に劣化部位を作成した。コイルはパラフィンで厚く含浸し、断熱状態を模擬した。コイルはクエンチ検出器を用いた能動回路で保護した。液体窒素中で 0.17 A/s の通電率で励磁し、各クエンチ検出電圧において励磁とクエンチを複数回繰り返しながら、検出電圧を徐々に上げていった。

3. 結果と考察

Fig. 1 に劣化層である第3層の電圧-電流(V-I)特性を示す。検出電圧が0.37 - 2.43 V の範囲ではクエンチ電流は52 - 63 A の間で変動しているが、V-I 特性の変化はほぼ見られない。しかし、検出電圧2.5 V においてクエンチを繰り返したところ、V-I 特性の劣化が顕著に進行し始め、クエンチ電流も46 A にまで減少した。検出電圧をさらに上げていくと、V-I 特性の劣化はさらに進み、検出電圧2.88 V においてはクエンチ電流が39 A にまで減少した。この時、他のターンにおいてV-I 特性に変化は見られなかった。

Fig. 2 にクエンチ時における第3層のピーク温度とクエンチ検出電圧の関係を示す。検出電圧が2.5 V 未満の領域では、ピーク温度は検出電圧に対して直線的に上昇している。しかし、2.5 V においてクエンチを繰り返したところ、ピーク温度が340 K から顕著に上昇し始めた。検出電圧をさらに上昇させた場合の結果については当日報告する。

これらの結果は以下のように解釈できる。まず、クエンチに伴う温度上昇のピーク温度が340 K に達したところでV-I 特性の劣化が進行する。そのため劣化部位からの発熱量が増え、クエンチ電流が減少する。クエンチ電流が低い場合、常伝導部の伝播が遅いため、同じ検出電圧でもクエンチ時の局所ピーク温度が高くなる。これによってさらにV-I 特性の劣化が進行する。この早期クエンチから始まるフィードバックループによって、劣化の進行とクエンチ電流の減少が続くと推察される。

4. 検討:4.2 K におけるクエンチ

本報では77 K で実験を行ったが、YBCO コイルでは4.2 K での高電流密度運転におけるクエンチ特性が重要である。そこで、実験で用いた劣化コイルを、4.2 K, 10 T 磁場中で励磁した場合のクエンチを有限要素法と回路方程式を組み合わせた数値計算コードで解析した。励磁中、コイル臨界電流で

ある500 A 以下の381 A において早期クエンチが起きた。Fig. 3 に示すように、クエンチ後わずか0.08 s 後に340 K に到達し、0.13 s 後に線材の溶断温度に到達している。液体窒素中での実験では、340 K に到達するのはクエンチ開始から5 s 後であった。この顕著な差は電流密度の違いによるものである。4.2 K における高電流密度運転の場合、クエンチ検出時間と検出電圧を小さく設定しても、早期クエンチによる劣化の進行とクエンチ電流の減少が容易に起きてしまうことが予想される。

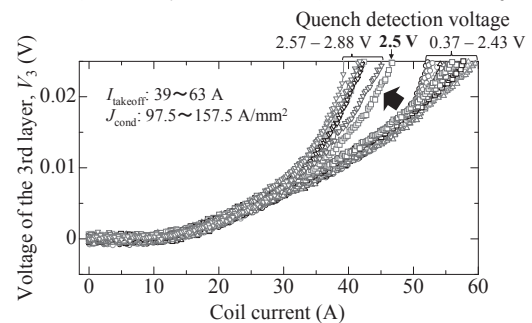


Fig. 1 Voltage-current curves for the degraded 3rd layer.

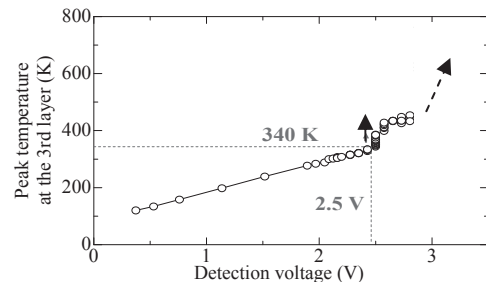


Fig. 2 Peak temperature due to premature quench vs. quench detection voltage.

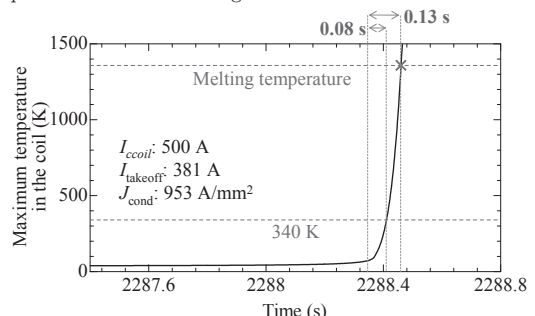


Fig. 3 Simulated coil temperature rise due to premature quench for the degraded 5-layered coil at 4.2 K in 10 T.

5. まとめ

特性劣化した YBCO コイルがクエンチを繰り返した場合、ピーク温度が340 K を超えたところから、劣化がさらに進行し、クエンチ電流も減少する。

本研究は(独) 科学技術振興機構の産学イノベーション加速事業・戦略的イノベーション創出推進による成果である。

参考文献

1. T. Takematsu, et al.: Physica C 470 (2010) 674-677.
2. S. Matsumoto, et al.: Submitted to IEEE Trans. Appl. Supercond.

シアノアクリレートを用いた高温超電導コイル含浸 Impregnated HTS coil with cyanoacrylate

水野 克俊, 小方 正文, 長嶋 賢(鉄道総研)

MIZUNO Katsutoshi, OGATA Masafumi, NAGASHIMA Ken (RTRI);

E-mail: mizuno59@rtri.or.jp

1. はじめに

希土類系高温超電導線材(以下 RE 線材)は磁場中での優れた通電特性を有するため超電導磁石への適用が期待されており,このような応用には優れた熱伝導特性と高い機械的強度がコイルに求められる。低温超電導コイルにおいてはエポキシ含浸が広く行われていたものの, RE 線材においては剥離方向の強度が低くエポキシとの熱応力によって線材の劣化を招くことが報告されている。[1]

熱応力による線材の劣化を防ぐ方法の一つとして, RE 線材の剥離強度以下の含浸材を用いることが考えられる。含浸を行う上では, 粘性が小さく真空含浸が可能であることも求められ, これらの条件を満たす含浸材としてシアノアクリレート系接着剤があげられる。シアノアクリレート系接着剤によって含浸された希土類系高温超電導コイルの通電試験を行ったので, その結果を報告する。

2. コイル含浸方法

シアノアクリレート系接着剤は瞬間接着剤として広く知られており, その特徴としては極めて粘性が低いことが上げられる。低粘度のものならば $1\sim 5 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ と一般的な低粘性エポキシ ($500\text{mPa}\cdot\text{s}$ 程度)と比べても十分に粘性が低い。また, シアノアクリレートは大気中や対象物の微小水分と反応して硬化するので, 真空含浸中に硬化してしまう恐れもない。

含浸用にサンプルコイル A, B を製作し, その外観を図 1 に, コイル仕様を表 1 に示す。サンプル A に対してはエポキシ(ブレニー技研: GM6800)真空含浸のみを行った。サンプル B に対してはシアノアクリレート(セメダイン: 3000RX)真空含浸を行った後, エポキシ真空含浸を重ねて行った。エポキシで二重含浸を行ったのは, シアノアクリレートが線材間に充填されているかの確認のためであり, もし線材間にエポキシが浸透するようであれば線材の劣化を招くと予想される。加えて, 超電導磁石用の超電導コイルはコイルケースに収められる場合も考えられ, コイルケースとの隙間の充填剤として従来から実績のあるエポキシを用いることがシアノアクリレート含浸コイルに対して可能であるかの検証も兼ねている。

3. 通電試験結果

サンプル A, B に対して液体窒素中での通電試験を行い, その結果を図 2 および 3 に示す。サンプル B に関してはエポキシ含浸前の, シアノアクリレート含浸のみの状態においても通電を行った。通常のエポキシ含浸を行ったサンプル A では, 含浸後に通電特性が大きく低下している($I_c: 45.5 \text{ A} \rightarrow 27.5 \text{ A}$, n 値: $27 \rightarrow 6$)。一方でシアノアクリレート含浸サンプル B に関しては, 含浸前後で明確な通電特性の変化は確認されなかった($I_c: 47 \text{ A} \rightarrow 47 \text{ A} \rightarrow 47.5 \text{ A}$, n 値: $28 \rightarrow 29 \rightarrow 28$)。

シアノアクリレート含浸コイルで性能低下が起きなかったのは接着強度が RE 線材の剥離強度よりも小さかったためであると推測される。エポキシ, およびシアノアクリレートに対して液体窒素中での引っ張り強度試験を行ったところ, エポキシでは最大 10 MPa を越える値が計測されたものの, シアノアクリレートでは 1 MPa 程度であった。そのため, コイルに熱応力が発生してもシアノアクリレートが破断するだけで, RE 線材の破損には至らなかったと考えられる。

本研究は国土交通省の国庫補助金を受けて実施した。



Fig.1 Overview of the sample RE coil.

Table 1 Specifications of sample RE coil.

Wire type	YBCO(MOCVD)/Hastelloy
Width / Thickness	4 mm / 0.1 mm
Min. I_c (77 K, s.f.)	90 A
Coil shape	Single pancake
Outer / Inner diameter	60 mm / 50 mm
Wire length	7 m
Turns	40
Bobbin material	Aluminum
Insulator	Polyimide

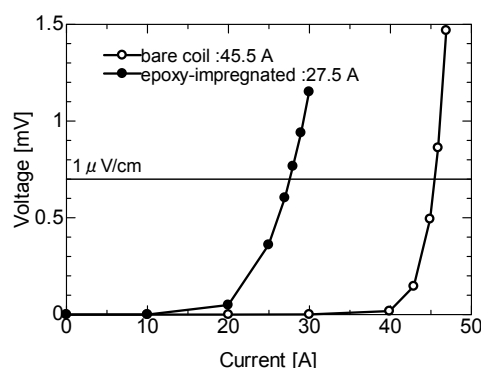


Fig.2 I-V curve of epoxy-impregnated RE coil (sample A).

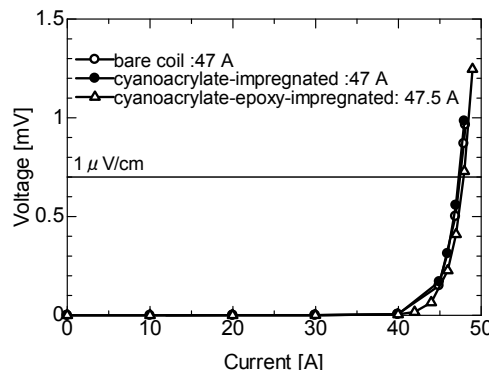


Fig.3 I-V curve of cyanoacrylate-impregnated RE coil (sample B).

参考文献

1. T. Takematsu, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 83 (2010) p.246

SMES 用 YBCO 超電導コイルのクエンチ検出と保護に関する数値解析評価

Numerical analysis of Quench detection and protection of YBCO coil for SMES

石山 敦士, 大西 秀明, 王 旭東(早稲田大学); 植田 浩史(大阪大学);
渡部 智則, 平野 直樹, 長屋 重夫(中部電力)

ISHIYAMA Atsushi, ONISHI Hideaki, WANG Xudong(Waseda Univ.); UEDA Hiroshi (Osaka Univ.);
TOMONORI Watanabe, HIRANO Naoki, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power)
E-mail: atsushi@waseda.jp

1. はじめに

現在, NEDO プロジェクトにおいて通電容量 2 kA, 絶縁電圧 2 kV, 運転温度 20 K の SMES 用伝導冷却 Y 系超電導コイルの開発が進められている。その中で, 我々は素線絶縁を施した Y 系積層導体を用いた伝導冷却コイルの熱的安定性・保護の検討を行っている。先に導体内の素線に局所的な常電導転移が発生した場合, 素線間の電流転流を監視することでクエンチ検出が可能であることを数値解析によって示した [1], [2]。今回はコイル保護方式として外部抵抗によってエネルギー回収を行う方式を前提とし, クエンチ検出後のコイル内の温度上昇や電流の減衰を数値解析によって調べた。また, 最も厳しい条件として積層導体の一部において素線すべてが同時に常電導転移した場合を想定して, 安定化層厚と最高到達温度の関係を評価したので報告する。

なお, 本研究は「リトリウム系超電導電力技術開発プロジェクト」の一部として NEDO の委託により, 実施したものである。

2. 解析条件

現在検討中のコイルは, Fig.1 のように導体として素線絶縁を施した YBCO 線材を 4 枚積層して集合導体化したものを用いることを想定している。通電電流 2160 A, 運転温度 20 K, 外部抵抗 1 Ω のとき, 導体を構成する 4 枚の素線のうち 1~3 枚が長手方向に 1 cm 常電導転移($I_c = 0$)した場合, 転流監視(100 A)によるクエンチ検出(Fig.2 (a)参照)後のホットスポットでの最高到達温度を数値解析した(Case:1)。また, 4 枚の素線すべてが同時に常電導転移($I_c = 0$)した場合, 電圧監視(0.1V)によるクエンチ検出(Fig.3 (a)参照)後の安定化層厚とホットスポットでの最高到達温度の関係を数値解析した(Case:2)。

3. 解析結果(Case:1)

通電電流 2160 A のとき, 4 枚の素線のうち 1 枚が長手方向に 1 cm 常電導転移($I_c = 0$)したと仮定し, 転流監視によるクエンチ検出の解析結果を Fig. 2 に, 電圧監視によるクエンチ検出の解析結果を Fig. 3 に示す。Fig. 2 では最高到達温度は 32 K, クエンチ検出時間は 1.45 s であった。一方, Fig. 3 では最高到達温度は 320 K, クエンチ検出時間は 13.3 s であった。また, 通電電流 2160 A のとき, 4 枚の素線のうち 2,3 枚が長手方向に 1 cm 常電導転移($I_c = 0$)したと仮定した場合, 転流監視によるクエンチ検出では最高到達温度はそれぞれ 50 K, 48 K となり, ホットスポットでの最高到達温度を 50 K 以下に抑えることができることがわかる。

4. 解析結果(Case:2)

通電電流 2160 A のとき, 積層導体の一部において 4 枚の素線すべてが同時に長手方向に 1 cm 常電導転移($I_c = 0$)したと仮定し, 安定化層厚に対するホットスポットでの最高到達温度とクエンチ検出時間の解析結果を Fig.4 に示す。同図より, 安定化層厚を厚くすると最高到達温度が減少し, クエンチ検出時間が長くなることがわかった。例えばホットスポットでの最高到達温度を 250 K 以下に抑えるのに必要な安定化層厚の厚さは 140 μm となる。

5. まとめ

コイル保護方式として外部抵抗によってエネルギー回収を行う方式での転流監視によるクエンチ検出後のコイル内の温度上昇や電流の減衰を数値解析によって調査した。結果, 転流監視によるクエンチ検出は従来の電圧監視によるクエンチ検出よりも有用であることを確認し, 4 枚の素線のうち 1~3 枚が常電導転移した場合では, 最高到達温度を 50 K 以下に抑えることができることを確認した。また, 4 枚の素線すべてが同時に常電導転移した場合に電圧監視によるクエンチ検出での安定化層厚と最高到達温度の関係を数値解析した。

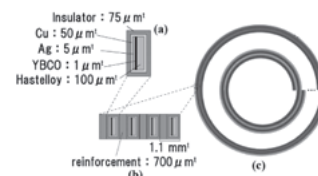
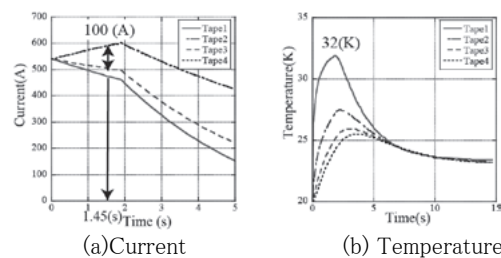


Fig.1 Schematic drawing of

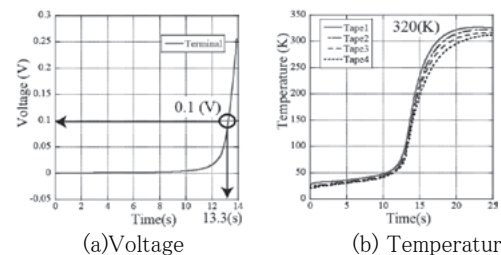
(a) YBCO tape, (b) conductor, and (c) pancake coil



(a) Current

(b) Temperature

Fig.2 Non-uniform current of 100 A



(a) Voltage

(b) Temperature

Fig.3 Terminal Voltage of 0.1 V

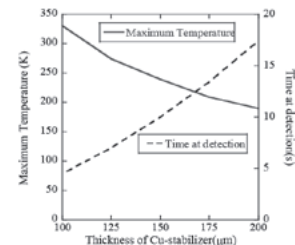


Fig.4 Temperature and time at detection voltage of 0.1 V for various Cu-stabilizer thickness

参考文献

1. A. Ishiyama, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 80 (2009) p.101
2. A. Ishiyama, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 82 (2010) p.154