

# Multi-Stacked 無絶縁 REBCO パンケーキコイルの 局所的常電導転移時の電磁的挙動

## Electromagnetic behavior during a local normal transition in multi-stacked no-insulation REBCO pancake coils

尾下 遥, 鄭 齊一, 市川 哲理, 柿本 雄太, 金原 徹郎, 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)

ONOSHITA Haruka, Zheng Qiyi, ICHIKAWA Tetsuri, KAKIMOTO Yuta, KINPARA Tetsuro, 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は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。しかし、積層 NI コイルでは、あるコイル内で常電導転移が発生すると通電電流が一定でも発生磁場が変化し、他のコイルに電圧が誘導され電流分布や全体の発生磁場が変化するという絶縁コイルとは異なる電磁的挙動をすると考えられる。そのためコイル内の振舞を明らかにする必要がある。今回は内径 60[mm]の小口径 NI ダブルパンケーキコイルを製作し、これを 3 個積層して局所的常電導転移を模擬した実験と数値解析を行い、NI コイル特有の電磁的挙動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。各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。さらに、NI コイルの中央にはホール素子が設置されている。実験は液体窒素中で行い、積層した各 NI コイル(DP1, DP2, DP3)はそれぞれ直列に接続して通電した。

### 3. 実験結果と数値解析結果

Fig.2 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を、Fig.3 に各 NI コイルの両端電圧の様子をそれぞれ示す。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]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ることから NI コイル内の電流分布が局所的常電導転移前に戻ったといえる。

また、Fig.4,5 に今回の実験に対して行った数値解析の結果から中心磁場の変化と各 NI コイルの両端電圧の様子をそれぞれ示す。なお、数値解析には各パンケーキコイル毎に周方向と径方向の電流を求める集約型簡易計算方法[3]を使用した。中心磁場の変化を実験結果と比較すると、ヒーター投入時のそれぞれのコイルにおける磁場減少やヒーター入熱を止めた後の中心磁場が元に戻っていく様子がよく再現された。

本研究は科研費基盤研究 A(No. 26249036)によった。

### 参考文献

1. A.Ikeda, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol.92 (2015) P.92
2. S.Yashiro, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol.93 (2016) P.12
3. S.Noguchi, et al.: Abstracts of CSSJ Conference Vol.95 (2017) P.20

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

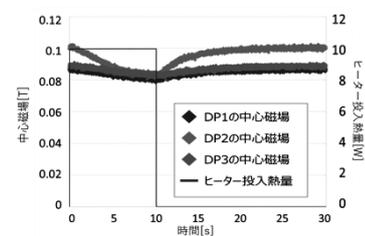


Fig.2 Magnetic field traces during a heater input (Experiment)

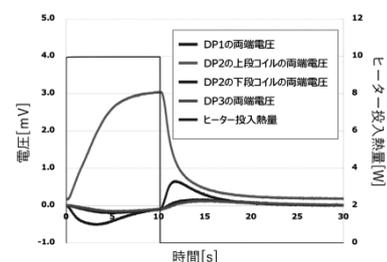


Fig.3 Voltage traces during a heater input (Experiment)

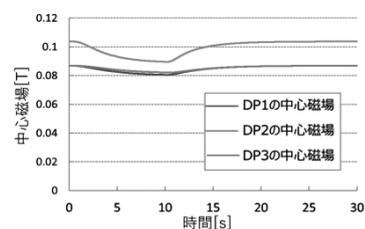


Fig.4 Magnetic field traces during a heater input (Simulation)

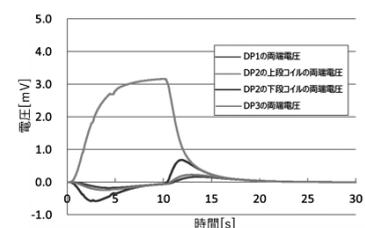


Fig.5 Voltage traces during a heater input (Simulation)

# 超高磁場用無絶縁 REBCO マグネットの熱的・機械的安定性

## Thermal and mechanical stability of no-insulation REBCO magnets for ultra high magnetic field generation

野口 聡 (北海道大学/MIT); PARK Dongkeun (MIT); HAHN Seungyong (SNU/NHMFL); 岩佐 幸和 (MIT)  
 NOGUCHI So (Hokkaido Univ./MIT); PARK Dongkeun (MIT); HAHN Seungyong (Seoul National Univ./NHMFL);  
 IWASA Yukikazu (MIT)

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

### 1. はじめに

無絶縁巻線技術 (No-Insulation Winding Technique; NI) [1] の登場により REBCO マグネットの安定性が向上した。液体窒素冷却下において、臨界電流以上の電流を通電しても、焼損することなく、ダメージを受けにくいマグネットとして広く認識されている。Self-Protecting 機能と呼ばれることもあり、REBCO マグネット開発に欠かせない技術となってきた。そして、超高磁場 (30 T 以上) 発生に NI-REBCO マグネットが応用され始めている。例えば、米国国立高磁場研究所 (NHMFL) では、31.1 T のバックグラウンド磁場中で、12 個の NI REBCO パンケーキで 14.4 T の発生に成功した (合計 45.5 T)。また、NHML ではインサートコイルに NI REBCO パンケーキを用いることで 32 T の発生にも成功している。MIT では、1.3 GHz NMR マグネットの開発を進めている。

本報告では、このような 30 T 以上の超高磁場を発生する際の NI REBCO マグネットの熱的・機械的安定性について、シミュレーションを通じて検討していく。

### 2. NI REBCO マグネットの熱的・機械的安定性

超高磁場マグネットに共通している事項としては、NI 巻線技術、パンケーキ巻きを採用し、インサートコイルとして使用、もしくはネスティッド構造をしていることである。そして、大電流を流すために、液体ヘリウムによる浸漬冷却を採用している。これまでの NI REBCO マグネットの性能試験では、液体窒素による浸漬冷却がほとんどであったため、運転電流の大きさが大きく異なっていると言える。しかし、NI REBCO マグネットを大電流運転している場合に、局所的な常電導転移が起きても、次ターンに電流が迂回することで、局所的な高発熱が起きなくなり、焼損を防げる。

一方で、超高磁場発生用 NI REBCO マグネットは、パンケーキが積層された構造が採用されており、一つのパンケーキが常電導転移した場合に、その隣のパンケーキコイルに大きな誘導電流が流れてしまう。そして、運転電流と誘導電流により発生するフープ力が許容フープ力を超え、パンケーキが破損することが予想される。したがって、このような NI REBCO マグネットは、常電導転移により焼損こそはしないが、機械的に大きなダメージを受けることになる。

### 3. 超高磁場 NI REBCO マグネットのシミュレーション

熱的・機械的安定性評価のためのシミュレーションとして、6 ダブルパンケーキ (DP) コイルが 15 T のバックグラウンドコイル中で運転している条件を想定する。6DP コイルの諸元を表 1 に示す。液体ヘリウムによる冷却を想定し、200 A 通電中に一番下のシングルパンケーキコイル (SP 12) が突然、常電導転移したと仮定した (図 1 中の 0.5 s に常電導転移)。シミュレーション方法は各コイルの周方向と径方向の電流を求める簡易方法 [2] を使用した。

図 1 に周方向電流と中心磁場の時間推移を示す。SP 12 が常電導転移し、まず SP 11 に大きな誘導電流が流れていることがわかる。そして、0.68 s 付近で SP 11 も常電導転移し、その後は、短時間に SP 10 → SP 1 と次々に常電導転移を引き

Table 1. Specification of 6DP NI REBCO coils

Coil id; od (mm)	30; 50
Coil height (mm)	4.0
Number of turns	200
Contact resistivity ( $\mu\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	70
Ic at 77 K (s.f.)	115
Operating temperature (K)	4.2

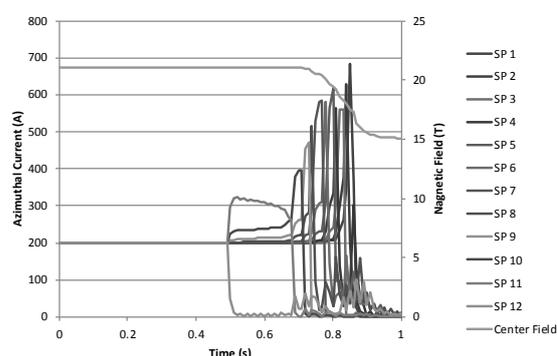


Fig. 1. Time transition of azimuthal current and on-axis field. The SP 12 transitions into normal state at 0.5 s.

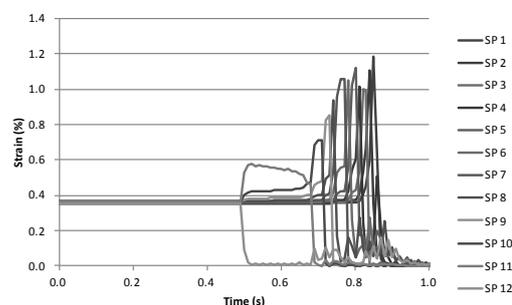


Fig. 2. Time transition of strain of each single pancake.

起こしている。そして、周方向電流も次第に大きくなっていることが分かる。

続いて、各パンケーキコイルの歪みの時間変化を図 2 に示す。REBCO テープ線材の最大許容歪みを 0.4% と想定した時、常電導転移前では問題ないが、0.5 s 以降は順次シングルパンケーキが常電導転移し、SP 1 - 11 の歪みが最大許容歪み 0.4% を超えていることが確認できる。これにより、REBCO テープ線材は機械的破損が起きたと想定できる。

以上より、超高磁場下での NI REBCO マグネットでも熱的に非常に安定しており、常電導転移を引き起こしても焼損することはないであろう。しかし、大電流が誘導されることにより、大きなフープ力が加わり、機械的な破損を引き起こすことがシミュレーションにより明らかになった。

### 参考文献

1. S. Hahn, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., 21 (2010) pp. 1592-1595.
2. S. Noguchi, et al.: Abstracts of CSSJ Conference Vo. 95 (2017) p. 20.

## 導電性樹脂を用いた REBCO コイルの伝導冷却試験

Test results of a conduction-cooled REBCO coil by using conductive epoxy resin

宮崎 寛史, 岩井 貞憲, 宇都 達郎, 草野 貴史, 小柳 圭, 石井 祐介, 野村 俊自 (東芝エネルギーシステムズ)

MIYAZAKI Hiroshi, IWAI Sadanori, UTO Tatsuro, KUSANO Takashi,

KOYANAGI Kei, ISHII Yusuke, NOMURA Shunji (Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation)

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

### 1. はじめに

高温超電導コイルは、熱的安定性が高いため、低温超電導コイルに比べてクエンチする可能性は低い。しかし、万が一クエンチしてしまうと、ホットスポットが発生し、焼損してしまう危険性が極めて高い。我々は、伝導冷却型高温超電導コイルの焼損を防止する方法として、導電性樹脂を用いてターン間を短絡させ、異常時には、導電性樹脂を介して電流を迂回させる方法を開発した。コイル保護は、一般的に電流密度および蓄積エネルギーが高いほど困難となるため、今回、導電性樹脂を使用した内径 500 mm, 2 積層の REBCO コイルを試作し、伝導冷却中にて通電試験を実施した。

### 2. コイル試作

樹脂含浸したコイルが冷却時の熱応力で劣化することを防止するために、コイルを径方向に分割することが有効である。径方向の分割とターン間の短絡を両立するため、離形処理したポリイミドテープと REBCO 超電導線材を共巻した含浸コイルにおいて、コイル側面のみ導電性樹脂で含浸する構成とした。導電性樹脂をコイル側面に塗布した内径 500 mm, 154 ターンのシングルパンケーキコイル 2 枚の間に伝熱板として 0.25 mm の高純度アルミシートを挿入して接着し、2 積層コイルを試作した。試作した 2 積層コイルの諸元を Table 1 に示す。

### 3. 伝導冷却試験

導電性樹脂を塗布した 2 積層コイルを伝導冷却試験装置に組み込み、高純度アルミシートを 2 段 GM 冷凍機の 2 段ステージに取り付けた。また、コイル温度を任意の温度に設定できるようにするため、2 段ステージにヒータを取り付けた。コイルに流れている周方向の電流と径方向の電流は直接測定することが困難であるため、中心磁場を測定して、磁場係数の値から周方向の電流を算出し、電源電流と周方向電流の差分から径方向電流を算出した。最初に、電流が導電性樹脂を介して径方向に迂回することを確認するため、コイル温度を 40 K に設定した状態で、10 A 通電し、遮断試験を実施した。Fig. 1 に規格化した電源電流  $I/I_0$  および中心磁場  $B/B_0$  を示す。時定数は、89 秒であり、径方向の抵抗に換算すると 1.2 m $\Omega$ であった。次に、コイル温度 40 K で、300 A 通電した状態で、2 段ステージに取り付けたヒータによりコイル温度を上昇させる試験を実施した。試験結果を Fig. 2 に示す。コイル温度の上昇とともに、コイルに電圧が発生し、周方向電流が減少して、径方向に迂回する現象が観測された。最終的に、2 積層間の差電圧が 1 V を超えて、電源が遮断したが、コイルは焼損することなく、その後の再測定の結果、劣化等の異常がないことを確認した。

### 4. まとめ

導電性樹脂を使用した内径 500 mm, 2 積層コイルを試作し、伝導冷却中にて通電試験を実施した。コイル温度 40 K, 300 A 通電時にコイル温度を上昇させる試験を実施した結果、コイルに電圧が生じてもすぐに熱暴走することなく、電流が径方向に迂回して、焼損を回避できることを確認した。

Table 1 Specification of two stacked pancake coils impregnated with conductive epoxy resin

Tape width (mm)	4
Tape thickness (mm)	0.17
Tape length (m)	518
Inner diameter (mm)	500
Outer diameter (mm)	570
Height (mm)	10
Number of turns/pancake	154
Number of pancake	2
Inductance (mH)	107
(Reference value)	

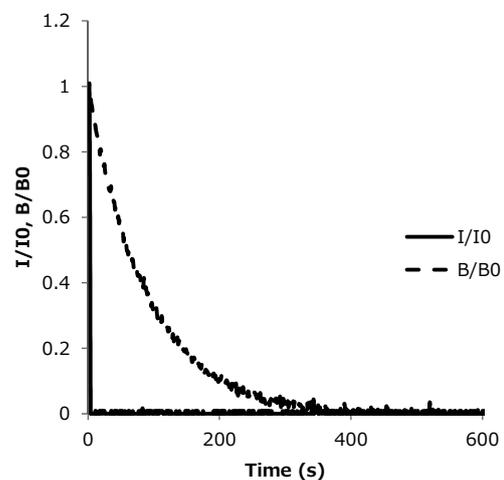


Fig. 1 Sudden discharging test result of two stacked pancake coils impregnated with conductive epoxy resin

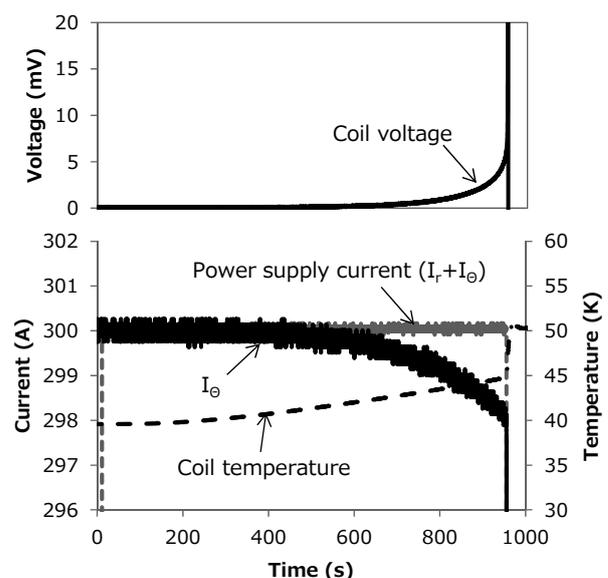


Fig. 2 Overcurrent test result of two stacked pancake coils impregnated with conductive epoxy resin

# 短尺線材を用いた模擬的実験による 薄膜線材で巻かれた伝導冷却マグネットのクエンチ保護についての検討(1)

## Examination of quench-protection possibility of coated-conductor magnets through simulation experiments using short pieces of coated conductor (1)

雨宮 尚之, 羅 熙捷, 井上 寛(京大); 曾我部 友輔(京大・学振 DC1)

AMEMIYA Naoyuki, LUO Xijie, INOUE Satoru (Kyoto University); SOGABE Yusuke (Kyoto University, JSPS DC1)

E-mail: amemiya.naoyuki.6a@kyoto-u.ac.jp

### 1. 背景

低温超伝導マグネットのクエンチ保護については、クエンチ検出器にて電圧を検出したのち、遮断器で電源からマグネットを切り離し、外部の保護抵抗でエネルギーを吸収するという方法が広く用いられている。一方、高温超伝導マグネットのクエンチ検出・保護は困難であると言われていたが、仮に電圧監視によりクエンチを検出できたとし、保護抵抗でエネルギーを吸収し電流を減少させれば焼損・劣化を防げるかどうかについて、系統的に調べた実験例は少ない。

### 2. 実験の考え方

高温超伝導線の遅いクエンチ伝搬を考慮すると、短尺線材を用いた実験で、マグネットのクエンチ初期についてある程度模擬できると考えられる。すなわち、常伝導転移検出後、実際のマグネットではインダクタンスと抵抗により決まる時定数で電流が指数関数減衰するところを、短尺線材では電流が指数関数減衰するように電源を制御すれば、隣接ターンの影響などを無視すれば、短尺線材の端まで常伝導部が到達するまでは、短尺線材の常伝導部の振る舞いはマグネットにおける常伝導部の振る舞いをある程度模擬できると考えられる。

### 3. 実験装置と短尺線材試料

実験装置の概念図を Fig. 1 に示す。試料は伝導冷却された有効長 150 mm の直線状薄膜線材で、線材面に垂直に最大 5 T の磁界を印加し、最大 500 A の電流を流すことができる。常伝導転移前の初期定常温度を測定するためのセルノックス温度センサ、常伝導部を発生させるためのヒータ、常伝導電圧を測定するための電圧タップが取り付けられている。

### 4. 実験手順

実験の手順は以下の通りである。

1. 試料に所定の磁界を印加する。
2. 試料の温度を所定の値に制御し、臨界電流を測定する。
3. 所定の電流を流し、温度を所定の値に制御する。
4. ヒータにより常伝導部を発生させる。
5. 試料全体の電圧(全電圧)が所定の値(検出電圧)になったら(マグネットのクエンチ検出を模擬)、所定の遅延時間待って(遮断器動作までの遅れなどを模擬)、試料電流をあらかじめ設定した時定数で指数関数減衰させる(外部抵抗によるエネルギー吸収時の電流減衰を模擬)。
6. 試料の劣化の有無を調べるため、臨界電流を測定する。以上の手順の実験を、(磁場、)温度、電流、検出電圧、(遅延時間、)電流減衰時定数を変化させて行う。

### 5. 実験結果の一例

一例として、磁界 2 T、初期定常温度 30 K、電流 240 A、検出電圧 100 mV、遅延時間 0.1 s、時定数 1.5 s の場合の、クエンチ・電流減衰過程の電流、全電圧、ヒータ付近の電圧をもとに分流モデルにより銅の抵抗の温度依存性から見積もったホットスポット温度の時間変化を Fig. 2 に示す。用いた線材の銅メッキ厚さは 41  $\mu\text{m}$  である。このクエンチ前後の 100  $\mu\text{V}/\text{m}$  で定義した臨界電流、10  $\mu\text{V}/\text{m}$  で定義した臨界電流、10–100  $\mu\text{V}/\text{m}$  でフィッティングして求めた  $n$  値を Table 1 に示した。この

場合、電流減衰が十分速やかであったために線材は劣化していないことがわかる。

### 謝辞

本研究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」の支援によるものである。

Table 1. Critical current and  $n$  value of sample before and after quench experiment (2 T, 30 K)

	Before	After
Critical current (100 $\mu\text{V}/\text{m}$ )	380 A	380 A
Critical current (10 $\mu\text{V}/\text{m}$ )	372 A	373 A
$n$ value (fitted from the $E$ - $I$ data within 10–100 $\mu\text{V}/\text{m}$ )	90	94

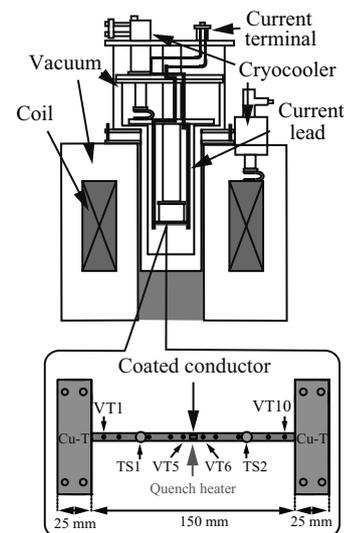


Fig. 1 Schematic view of experimental setup (VT: voltage tap, TS: temperature sensor, Cu-T: copper current terminal).

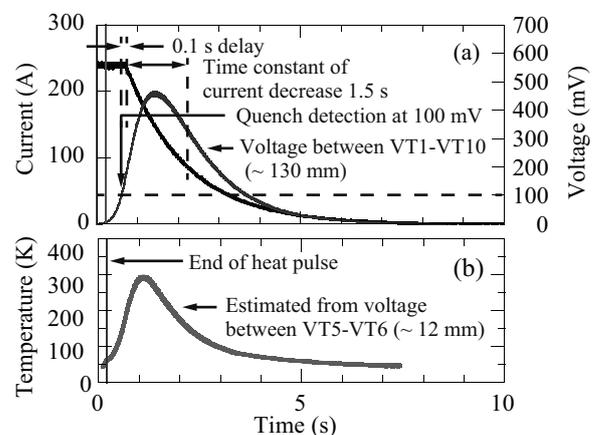


Fig. 2 An example of experiment results: (a) current and voltage of entire sample (VT1-VT10), (b) estimated hot spot temperature near quench heater (VT5-VT6).

# 短尺線材を用いた模擬的実験による薄膜線材で巻かれた伝導冷却マグネットのクエンチ保護についての検討(2)

## Examination of quench-protection possibility of coated-conductor magnets through simulation experiments using short pieces of coated conductor (2)

羅 熙捷, 井上 覚(京大); 曾我部 友輔(京大・学振 DC1); 雨宮 尚之(京大)  
 LUO Xijie, INOUE Satoru (Kyoto University), SOGABE Yusuke (Kyoto University, JSPS DC1);  
 AMEMIYA Naoyuki (Kyoto University)  
 E-mail: x-luo@asl.kuee.kyoto-u.ac.jp

### 1. 目的

「短尺線材を用いた模擬的実験による薄膜線材で巻かれた伝導冷却マグネットのクエンチ保護についての検討(1)」で説明した方法により、主に、電流の大きさ、電流減衰時定数を変化させて、劣化・焼損が起こらない、言い換えればマグネットのクエンチ保護の可能性のある運転領域を見極めることが、本報告の実験の目的である。

我々は、薄膜線材で巻いたコイルで構成された 2 極マグネットを放医研の HIMAC ビームラインに設置し、粒子ビーム入射に対する安定性を評価する予定である。今回の実験は、これに先立ち、粒子ビーム入射により常伝導部が発生したときのクエンチ保護の可能性を検討するものとも位置付けられる。

### 2. 試料線材

Table 1 に諸元を示すフジクラと SuperPower で製造された二種類の線材で実験を行った。前者は厚さ  $41 \mu\text{m} \times 2$  の銅安定化層を持ち、温度 30 K、外部磁場 2 T で臨界電流値が約 380 A である。この線材は、放医研で試験されるマグネットの製作に用いた線材とほぼ同等なものである。後者は、厚さ  $20 \mu\text{m} \times 2$  の銅安定化層を持ち、温度 30 K、外部磁場 2 T で臨界電流値が約 220 A である。

### 3. 実験結果

電流の大きさ、電流減衰時定数を変化させてクエンチ試験を行った。クエンチにより劣化・焼損が起こったかどうかを Fig. 1 にまとめた。Fig. 1 に示したクエンチ試験は全て磁界 2 T、温度 30 K、常伝導検出電圧到達から電流減少開始までの遅延時間 0.1 s で行った。Fig. 1(a) のフジクラ製線材の試験、Fig. 1(b) の SuperPower 製線材の試験で、検出電圧はそれぞれ 100 mV、50 mV としたが、意図して異なる値としたわけではない。各セルにおいて、番号は当該試料線材のクエンチ試験の通し番号、○・× はクエンチ試験後に臨界電流の劣化(あるいは断線)があったかどうかを示している。また、一部のセルに書かれている温度は分流モデルと銅の抵抗値の温度依存性を用いて、クエンチヒータ付近の電圧から計算したホットスポット温度である。

銅安定化層厚さが  $41 \mu\text{m} \times 2$  のフジクラ製線材で、電流減衰時定数を 1 s とした場合、電流を 290 A まで上げてもクエンチによる臨界電流の劣化は見られなかった。電流減衰時定数を 1.5 s すると、240 A まででは劣化が見られなかったが、260 A でのクエンチ試験後、臨界電流値の低下が観測された。このときの線材断面積と銅安定化層断面積で平均した電流密度はそれぞれ  $383 \text{ A/mm}^2$ 、 $779 \text{ A/mm}^2$  であった。

銅安定化層厚さが  $20 \mu\text{m} \times 2$  の SuperPower 線材で、電流減衰時定数を 1 s とした場合、180 A まででは劣化が見られなかったが、190 A でのクエンチ試験で試料が焼損断線した。このときの線材断面積と銅安定化層断面積で平均した電流密度はそれぞれ  $475 \text{ A/mm}^2$ 、 $1188 \text{ A/mm}^2$  であった。

Fig. 2 には、試験後の線材の様子を示してある。劣化・焼損には完全に焼損する場合、バンプする場合、線形な電圧が現れる場合など様々なケースがあった。

冷却条件やクエンチ過程における応力の状態など、実際のマグネットと短尺線材には違いがあるが、今回の実験結果は、常伝導電圧検出、電源遮断、外部抵抗によるエネルギー吸収という古典的方法での高温超伝導マグネットのクエンチ保護の可能性を示唆するものである。

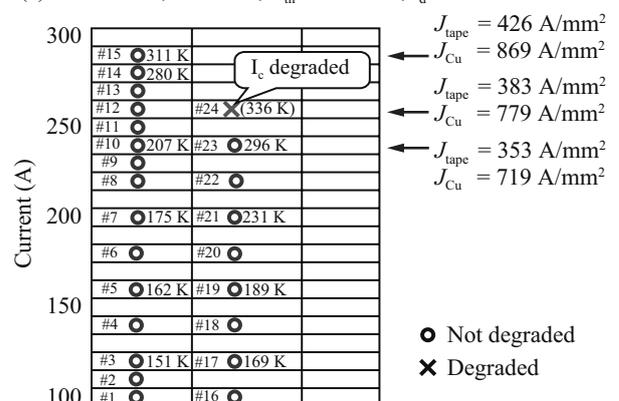
### 謝辞

本研究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」の支援によるものである。

Table 1. Sample information

	Type	FYSC-SCH04
Fujikura	Width of sample	4.07 mm
	Thickness of copper on each side	41 $\mu\text{m}$
	Type	SCS4050
SuperPower	Width of sample	4 mm
	Thickness of copper on each side	20 $\mu\text{m}$

(a)  $B = 2 \text{ T}$ ,  $T = 30 \text{ K}$ ,  $V_{th} = 100 \text{ mV}$ ,  $t_d = 0.1 \text{ s}$



(b)  $B = 2 \text{ T}$ ,  $T = 30 \text{ K}$ ,  $V_{th} = 50 \text{ mV}$ ,  $t_d = 0.1 \text{ s}$

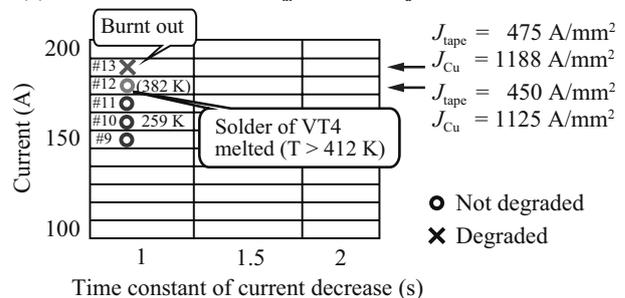


Fig. 1 Experiment results: (a) Fujikura, (b) SuperPower.

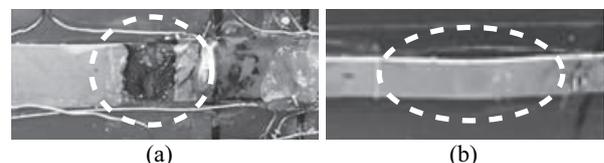


Fig. 2 Photo of sample after experiments: (a) burn out, (b) bump.

# 素線絶縁のない複数のテープ線で構成される導体を用いた 高温超電導パンケーキコイルの局所的 $I_c$ 低下に対する安定性

## Stability against local critical current degradation in HTS pancake coil using conductor composed of multiple tape wires without wire insulation

西岡 翼, 宮城 大輔, 津田 理(東北大学); 高尾 智明, 塚本 修巳(上智大学)  
NISHIOKA Tsubasa, MIYAGI Daisuke, TSUDA Makoto (Tohoku Univ.);  
TAKAO Tomoaki, TSUKAMOTO Osami (Sophia Univ.)  
E-mail: tsubasa.nishioka.t1@dc.tohoku.ac.jp

### 1. はじめに

近年, 高磁場化へ向けて高温超電導コイルの製作が行われているが, 巻数を増やす程インダクタンスが増加し, 異常時のコイル保護が遅れてしまう事が問題となっている。そこで, 本研究では, 導体間は絶縁されているものの, 導体を構成するテープ線間は絶縁されていない2並列導体に着目し, 局所的に通電特性が劣化した場合の電流・温度分布解析を行うことにより, コイルの安定性を検討した。

### 2. 解析方法・諸元

解析では, 2並列導体を75ターンしたシングルパンケーキコイルを対象とした。Table.1にコイルの諸元を示す。テープ線の臨界電流値は, 正常部が200Aであるのに対して劣化部を100Aとし, 電流分布解析にはFig.1の電気回路モデルを用いた[1]。円周方向の分割数を12とし, 18周目の1要素が劣化しているとした。また, 温度分布解析は, 初期温度を77Kとし, 断熱条件下で行った。なお, 励磁速度を40A/s, 目標電流を280A(負荷率0.7)とし, 目標電流到達後は, 目標電流で一定とした。

### 3. 電流分布解析結果

導体に劣化部が無い場合における, 目標電流到達時と, 十分時間が経過した1000秒後の電流分布解析結果をFig.2に示す。ここで, 横軸は, コイルの巻数に対応し, 縦軸は, 並列導体を構成する各テープ線の電流値に対応している。目標電流到達時は, 入力端(1ターン目)付近において, 並列導体内側(テープ線1layer)に電流が集中する偏流現象が見られた。しかし, 出力端(75ターン目)に近づくにつれて, 電流の大小が逆転し, 並列導体外側(テープ線2layer)に電流が偏流した。また, 時間が経過するにつれて, 偏流は次第に解消され, 1000秒後には, ともに一定の電流値に落ち着いた。導体に劣化部がある場合の結果をFig.3に示す。これより, 劣化部だけでなく, 正常部においても偏流が発生し, 1000秒が経過しても, 偏流が解消されないことが分かった。

### 4. 温度分布解析結果

劣化部無しの場合には, 目標電流到達直後(7秒後)において, コイル入力端・出力端付近で発熱が見られた。これは, Fig.2の様に, コイル端部を中心に偏流が発生して, 発熱が生じたためである。その後, 時間が経過するにつれて, 偏流が解消され, 発熱量も減少したため, 1000秒後の温度上昇は全体として0.04K程度であった。一方, 劣化部有りの場合は, 目標電流到達直後に劣化部を中心として, 局所的に0.07K程度の温度上昇が見られたが, 2350秒が経過しても熱暴走は発生しなかった。なお, 2350秒後の劣化部付近の温度上昇は, 1.93K程度であった。以上より, 素線絶縁の無い, 複数のテープ線で構成される導体を用いてコイルを構成すれば, 劣化部があり, 転流時の最大電流が高負荷率になる場合でも, コイルの熱的安定性を長時間保持できることが分かった。

### 謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP16K06238 の助成を受けたものです。

Table 1. Specifications of sample HTS pancake coil

Sample	
Coil inner diameter [m]	1.5
Tape thickness (Insulation) [mm]	0.22
Tape thickness (Non insulation)[mm]	0.16
Tape width[mm]	4.0
n value	33
Number of Turns	75

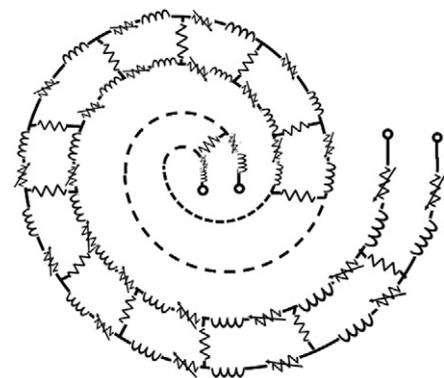


Fig.1 Electrical circuit for an HTS pancake coil using a conductor composed of two tape wires without wire insulation

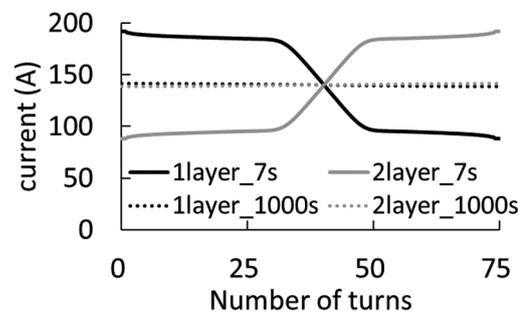


Fig.2 Current distribution in an HTS pancake coil without local critical current degradation

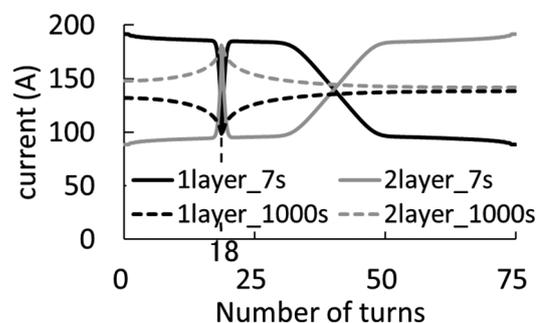


Fig.3 Current distribution in an HTS pancake coil with local critical current degradation

### 参考文献

[1] Tao Wang et al: IEEE vol.25,no. 3 2015