

## 高磁場 MRI 用高温超電導磁石の開発(16 年春)

## — 全体概要 —

## HTS magnet R&amp;D project for ultra-high field MRI (2016 spring)

## - Project overview -

戸坂 泰造, 宮崎 寛史, 岩井 貞憲, 宇都 達郎, 大谷 安見, 田崎 賢司, 野村 俊自, 来栖 努(東芝);  
石山 敦士(早大); 植田 浩史(早大/岡山大); 野口 聡(早大/北大); 浦山 慎一, 福山 秀直(京大)  
TOSAKA Taizo, MIYAZAKI Hiroshi, IWAI Sadanori, UTO Tatsuro, OTANI Yasumi, TASAKI Kenji, NOMURA Shunji,  
KURUSU Tsutomu (TOSHIBA); ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.); UEDA Hiroshi (Waseda Univ./Okayama Univ.);  
NOGUUCHI So (Waseda Univ./Hokkaido Univ.); URAYAMA Shinichi, FUKUYAMA Hidenao (Kyoto Univ.)  
E-mail: taizo.tosaka@toshiba.co.jp

## 1. はじめに

従来の MRI は、水素原子核を検出していたのに対して、高磁場化により、炭素、窒素、酸素、リンなどの検出が可能になることから、高磁場 MRI は、従来の構造診断とは異なる、全く新しい機能診断装置になり得ることが期待されている。また、高温超電導磁石技術によって、小型化、軽量化、液体ヘリウムレス化(伝導冷却)が可能となることを背景として、一般病院にも設置可能な高磁場 MRI の実現を目指している。2013 年度からは、経済産業省のプロジェクトとして、高温超電導磁石開発が始められた。このプロジェクトは 2015 年度に国立研究開発法人日本医療研究開発機構のプロジェクトとして引き継がれ、2015 年度末に 3 年間のプロジェクトとして終了した。本発表では、本プロジェクトの全体概要として、目標および得られた成果などについて報告する。

## 2. プロジェクトの目標

3 年間のプロジェクトとしては、高温超電導線材を調達する観点等で実規模の高温超電導を試作することが困難である。そこで、Fig. 1 に示すように、高磁場 MRI 用磁石を実現するために重要となる高磁場化と大口径化のそれぞれ指標について試作・検証を行い、設計とシミュレーションで、ヒト用 9.4T MRI への適用実現性を確認することとした。

最終年度である今年度の実施内容として、高磁場化については、昨年度に試作したコイル内径  $\phi 50$  mm の極小口径コイル(10 T test coil)の 22 枚積層したパンケーキコイルのうちの一部を、磁場中特性が向上した線材を用いて新たに試作したパンケーキコイルと交換することで、9.4 T 以上の高磁場を発生させることを目標とした。また、大口径化については、コイル内径  $\phi 500$  mm、室温ボア  $\phi 396$  mm の小型磁石(1.5T model magnet)を新たに試作し、200 mmDSV の空間に不均一度 10 ppm 以下、時間変動 10 ppm/h 以下の磁場を発生させることを目標とした。

## 3. 得られた成果

極小口径コイルと小型磁石(Fig. 2)を、伝導冷却で試験評価した結果として、以下の成果が得られた。

## 【高磁場発生の検証(極小口径コイル)】

- ・発生磁場(中心): 13.5T@10K
- ・遮蔽電流磁場: 解析計算とほぼ一致(予測可能)

## 【大口径化の検証(小型磁石)】

- ・200mmDSV の磁場均一度: 4.1 ppm
- ・磁場安定度: 0.8 ppm/h
- ・水ファントムの撮像

上記以外にも、小コイルを試作し、また解析計算等を行うことで遮蔽電流磁場やコイル保護等に関する、設計・製造基盤技術の研究も実施している。これらの結果を踏まえてヒト用 9.4 T MRI の試設計を行い、以下設計案を得た。

## 【ヒト用高磁場 MRI 磁石の設計検証】

- ・400 mmDSV の磁場均一度: 1.4 ppm
- ・漏れ磁場: 3 T 機と同等レベル( $r3.1 \text{ m} \times z4.7 \text{ m}$ )

## 4. まとめ

本プロジェクトでは、目的としていた主要な項目で目標を上回る成果が得られた。一般病院に設置可能な高磁場 MRI システムを実現するためには、本プロジェクトのスコープ外とした、実機レベルでの高電磁応力設計やコイル保護等の試作・検証が必要である。引き続き、高磁場 MRI 用磁石の技術開発を進めていく。

## 謝辞

本研究は、日本医療研究開発機構の未来医療を実現する医療機器・システム研究開発事業「高磁場コイルシステムの研究開発」を通じて実施された。

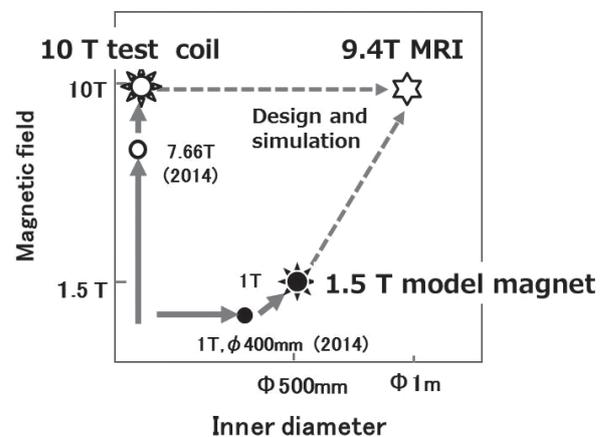


Fig.1 Approach to 9.4 T MRI magnet

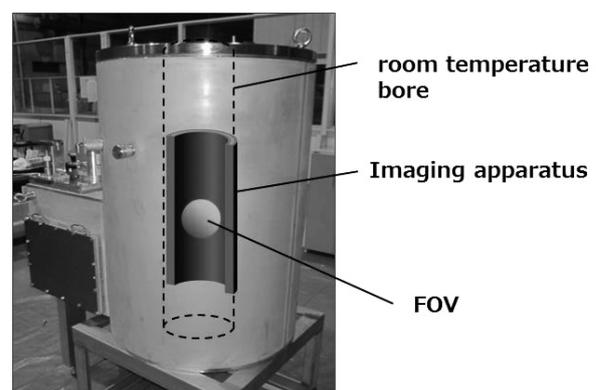


Fig.2 1.5 T model magnet

**高磁場 MRI 用高温超電導磁石の開発(16 年春)**  
**—伝導冷却 1.5 T-MRI 磁石の試験結果—**  
 HTS magnet R&D project for ultra-high field MRI (2016 spring)  
 —test results of a conduction-cooled 1.5 T REBCO MRI magnet—

宮崎 寛史, 岩井 貞憲, 宇都 達郎, 大谷 安見, 戸坂 泰造, 田崎 賢司, 野村 俊自, 来栖 努(東芝);  
 石山 敦士(早大); 植田 浩史(早大/岡山大); 野口 聡(早大/北大), 浦山 慎一, 福山 秀直(京大)  
 MIYAZAKI Hiroshi, IWAI Sadanori, UTO Tatsuro, OTANI Yasumi, TOSAKA Taizo, TASAKI Kenji, NOMURA Shunji,  
 KURUSU Tsutomu (TOSHIBA); ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.); UEDA Hiroshi (Waseda Univ./Okayama Univ.);  
 NOGUUCHI So (Waseda Univ./Hokkaido Univ.); URAYAMA Shinichi, FUKUYAMA Hidenao (Kyoto Univ.)  
 E-mail: hiroshi17.miyazaki@toshiba.co.jp

### 1. はじめに

REBCO 線材を用いた 60 枚のパンケーキコイルで構成された伝導冷却型 1.5 T-MRI マグネットを開発した。室温ボア  $\phi$  400 mm で撮像空間は 200 mm DSV である。本発表では、マグネットの通電試験結果および  $\phi$  200 mm の球状空間に MRI 品質の磁場を発生させた結果について報告する。

### 2. マグネット製作

内径  $\phi$  500 mm、外径  $\phi$  520 mm、 $\phi$  524 mm、548 mm の 3 種類のパンケーキコイル計 60 枚を、設計値に対して径方向誤差が  $\pm 0.4$  mm となるように 10 ターン間隔で外径寸法を測定して調整しながら巻線した。60 枚のパンケーキコイルの径方向誤差は -0.31 から 0.36 mm、厚さ方向の誤差は -0.16 mm から 0.03 mm であった。次に、全パンケーキコイルを液体窒素中にて通電試験を実施し、 $n$  値 ( $10^{-9}$  -  $10^{-8}$  V/cm 定義) がすべて 20 以上と超電導特性に劣化がないことを確認後、パンケーキコイルの積層作業を実施した。積層後、再度液体窒素中での通電試験により超電導特性に劣化がないことを確認後、Fig.1 に示すように SUS 支持材にコイルを固定し、マグネットを製作した。コイルは GM 型のパルスチューブ冷凍機 2 台で伝導冷却され、室温から約 55 時間で 4.7 K に到達した。

### 3. 試験結果

0.02 A/s の励磁速度で 192 A まで励磁し、1.5 T に到達した。1.5 T 到達後の温度は 5.1 K であった。各パンケーキコイルの電圧は 0.01 mV 以下であり、劣化等の異常がないことを確認した。続いて  $\phi$  200 mm 球の空間磁場分布を評価した結果を Table1 に示す。磁場均一度は 249.7 ppm (VRMS) であり、低次の項に大きな不整磁場が見られた。不整磁場の原因は、パンケーキ積層時の寸法誤差の影響と推定される。次に、鉄シムによる補正を実施した結果を Table1 に示す。鉄シムによる補正により、磁場均一度 4.1 ppm となり目標の 10 ppm 以下を達成した。また、電流の時間安定度を測定した結果を Fig.2 に示す。通常励磁の場合には 2 ppm/h であり、電流を 196 A までオーバシュートすることで 1 ppm/h 以下 (0.8 ppm/h) を達成した。

### 4. まとめ

REBCO 線材を用いた伝導冷却型 1.5 T-MRI マグネットを開発し、定格励磁により、コイル電圧等に異常がないことおよびコイル温度差が 0.1 K 未満と均一に冷却できていることを確認した。また、200 mm 球の空間磁場分布を測定した結果、磁場均一度 4.1 ppm、時間安定度 0.8 ppm/h と MRI 品質の磁場発生を実現することに成功した。

<謝辞> 本研究は、日本医療研究開発機構の未来医療を実現する医療機器・システム研究開発事業「高磁場コイルシステムの研究開発」を通じて実施された。



Fig.1 Photograph of a conduction-cooled REBCO coil

Table1 Inhomogeneous magnetic field over 200 mm DSV

Name	Initial values	After passive shim
Z	-314.8	0.1
X	223.1	2.5
Y	-45.1	2.0
Z2	579.6	4.3
ZX	68.2	0.5
ZY	-3.2	-0.1
X2-Y2	40.7	0.9
XY	1.2	-0.7
Z3	34.0	0.2
Z4	-90.0	-3.1
Z5	14.1	1.2
Z6	-8.2	-0.9

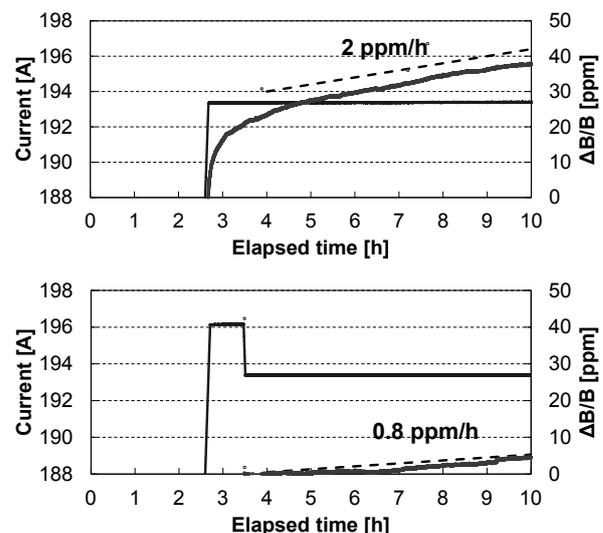


Fig.2 Behavior of magnetic field relaxation observed in the 1.5 T-MRI magnet (a) without current reversal and (b) with about 1% current reversal

## 高磁場 MRI 用高温超電導磁石の開発(16 年春)

## — 9.4 T 高温超電導 MRI 磁石設計 —

HTS magnet R&amp;D project for ultra-high field MRI (2016 spring)

— Design of a conduction-cooled REBCO magnet for 9.4 T MRI system —

宮崎 寛史, 岩井 貞憲, 宇都 達郎, 大谷 安見, 戸坂 泰造, 田崎 賢司, 野村 俊自, 来栖 努(東芝);

石山 敦士(早大); 植田 浩史(早大/岡山大); 野口 聡(早大/北大); 浦山 慎一, 福山 秀直(京大)

MIYAZAKI Hiroshi, IWAI Sadanori, UTO Tatsuro, OTANI Yasumi, TOSAKA Taizo, TASAKI Kenji, NOMURA Shunji,

KURUSU Tsutomu (TOSHIBA); ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.); UEDA Hiroshi (Waseda Univ./Okayama Univ.);

NOGUUCHI So (Waseda Univ./Hokkaido Univ.); URAYAMA Shinichi, FUKUYAMA Hidenao (Kyoto Univ.)

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

## 1. はじめに

コイル外径  $\phi$  130 mm の小型コイルによる 9.4 T 以上の磁場発生の実証および 400 mm ボアを有する 1.5 T-MRI 磁石による大口径化の検証で得られた知見をもとにヒト用 9.4 T 高温超電導 MRI 磁石設計を実施した。本発表では、アクティブシールド付コイル最適配置の検討結果および電磁力計算結果等について説明する。

## 2. 計算条件

9.4 T ヒト用 MRI マグネットを想定して、室温ボア  $\phi$  700 mm、均一磁場空間 400 mm、磁場均一度 5 ppm 以下を満足するコイル最適配置を計算した。磁場均一度は、コイル形状、位置および電流密度等に依存するが、製作性を考慮して以下の条件にて計算した。

- ・シングルパンケーキコイルで構成
- ・コイル数 4 対(主磁場 3 対、アクティブシールド 1 対)
- ・主磁場コイルの内径は  $\phi$  800 mm 以上
- ・アクティブシールドコイル外径は 2000 mm 以下
- ・線材幅 4 mm、厚み 0.1 mm
- ・補強線の幅 4 mm
- ・フープ力 500 MPa 以下(補強線にて調整)
- ・5 ガウスライン(軸方向 6 m 以下、径方向 3.5 m 以下)

コイル内径、ターン数、コイル位置、パンケーキ数および補強線の厚みをパラメータとして、不整磁場が極小となるコイル配置を計算した。

## 3. 計算結果

コイル配置計算結果を Fig.1 および Fig.2 に示す。電流値は線材一枚あたり 299.7 A、トータル線材長は 409 km、蓄積エネルギーは 222 MJ となった。また、球面調和関数の係数を Table1 に 5 ガウスラインを Fig.3 に示す。 $\phi$  400 mm 球での磁場均一度は 1.4 ppm、5 ガウスラインは軸方向 4.7 m、径方向 3.1 m であり、ともに目標を満足することを確認した。フープ力は最大 150 MPa と 500 MPa に対して十分余裕があるが、軸圧縮力は端部の主磁場コイルで 51 MPa と非常に大きな値となった。支持構造として、フープ力はコイル自身で支えることとし、主磁場コイル 3 対を一体化して支持することで軸圧縮力を支える構造が有効であると考えられる。

## 4. まとめ

REBCO 線材を用いた伝導冷却型 9.4 T 高磁場 MRI 磁石設計を実施した。3 対の主磁場コイルと 1 対のアクティブシールドコイルを組み合わせることで、磁場均一度 1.4 ppm、漏れ磁場(軸方向 4.7 m、径方向 3.1 m)を満足し、フープ力を 500 MPa 以下とするコイル設計案を見出した。今後、高磁場 MRI の実現に向けて、磁場時間安定度 0.1 ppm/h 以下の実現および 222 MJ のエネルギー回収方法などの技術課題を克服していく必要がある。

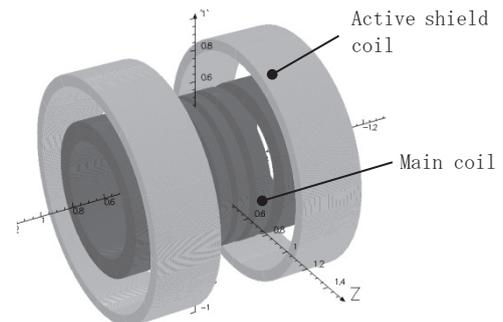


Fig.1 Coil positions for 9.4 T-MRI magnet

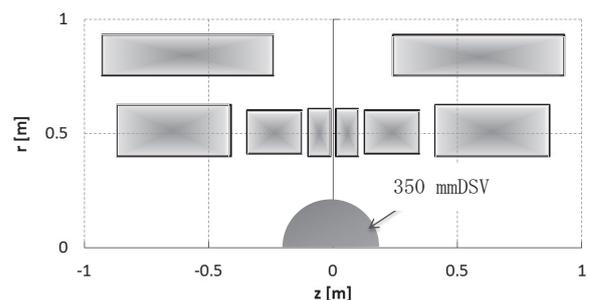


Fig.2 Two-dimensional axisymmetric drawing of coil positions

Table1 Inhomogeneous magnetic field over 400 mm DSV

Name	Z2	Z4	Z6	Z8	Z10	Z12
Value (ppm)	-0.83	5.09	3.38	3.65	-10.9	1.67

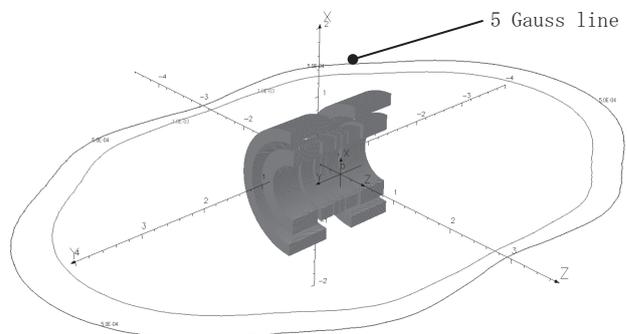


Fig.3 5 gauss line of 9.4 T-MRI magnet

## 謝辞

本研究は、日本医療研究開発機構の未来医療を実現する医療機器・システム研究開発事業「高磁場コイルシステムの研究開発」を通じて実施された。

**高磁場 MRI 用高温超電導磁石の開発(16年春)**  
**-REBCO マルチコイルにおける遮蔽電流による不整磁場の低減法-**  
 HTS magnet R&D project for ultra-high field MRI (2016 spring)  
 -Reduction technique of Irregular Magnetic Field Distribution  
 Generated by Screening Current in Multiple REBCO Coils-

小曽根 裕一, 王 韜, 石山 敦士(早大); 植田 浩史(岡大); 野口 聡(北大);  
 宮崎 寛史, 戸坂 泰造, 野村 俊自, 来栖 努(東芝)

Ozone Yuichi, Wang Tao, Ishiyama Atsushi (Waseda University); Ueda Hiroshi (Okayama University); Noguchi So (Hokkaido University); Miyazaki Hiroshi, Tosaka Taizo, Nomura Shunji, Kurusu Tsutomu (Toshiba)  
 E-mail: ozone@fuji.waseda.jp

### 1. はじめに

我々は、10 T 級(9.4 T)ヒト全身用 MRI への適用を目指した高温超電導コイルの研究開発を行ってきた[1]。REBCO コイルでは、線材がテープ形状をしているためテープ面への垂直な磁場により遮蔽電流が顕著に誘導されてしまう。それにより不整磁場(以下、遮蔽電流磁場)が発生し、磁場の空間的均一性や時間的安定性に影響を及ぼす。さらに、MRI では複数のコイルを使用したマルチコイル構造が用いられるため、各コイルの発生磁場が相互に影響し合い、遮蔽電流がより複雑に誘導される。そのため様々な励磁条件における遮蔽電流磁場の振舞いを明らかにする必要がある。本研究では、REBCO マルチモデルコイルを作製し、遮蔽電流磁場の低減に適したオーバーシュート量について実験と数値解析により検討したので報告する。

### 2. 実験手順と解析

使用した REBCO 線材は、幅 5 mm、厚さ 0.13 mm である。マルチコイルは内径 100 mm、外径 131-132 mm、巻数 105-114 のシングルバンケーキコイル(SP)2つ、ダブルバンケーキコイル(DP)1つを積み重ねて作製した。また、磁場計測点として5つのホール素子を中心および  $r = 25$  mm の球面上に2ヶ所とコイル付近2ヶ所に設置した。コイルの概略図と磁場計測点を Fig. 1 に示す。実験手順は以下の通りである。

1) まず、コイルに三角波を通电して通电電流に対する遮蔽電流磁場のヒステリシスを調べる。2) その結果より遮蔽電流磁場が 0G となる点をみつける。3) この結果から、オーバーシュート量を調整し、励磁実験を行った。なお、実験は液体窒素中で行い、Sweep Rate は 10 A/min とした。

遮蔽電流磁場解析は超電導特性を考慮した三次元非線形有限要素法と高速多重極法を用いた[2]。

### 3. 結果と考察

Hall(1)における通电電流に対する遮蔽電流磁場のヒステリシスの結果を Fig. 2 に示す。グラフより 50 A 通电後、32 A まで戻すと遮蔽電流磁場が 0G になることがわかった。そこで、通电電流 32 A に対して 56.3%のオーバーシュート(50 A に相当)を行った。その結果を Fig. 3 に示す。プロットが実験結果、実線が解析結果である。Fig. 3 より、遮蔽電流磁場をゼロ近くまで低減でき、時間的にも安定していることがわかる。また、実験と解析で定量的な誤差はみられるものの遮蔽電流磁場の振舞いを再現できている。以上より、ヒステリシスから遮蔽電流磁場の低減に適したオーバーシュート量を見積もることがわかった。

### 謝辞

本研究は、日本医療研究開発機構の未来医療を実現する医療機器・システム研究開発事業「高磁場コイルシステムの研究開発」を通じて実施された。

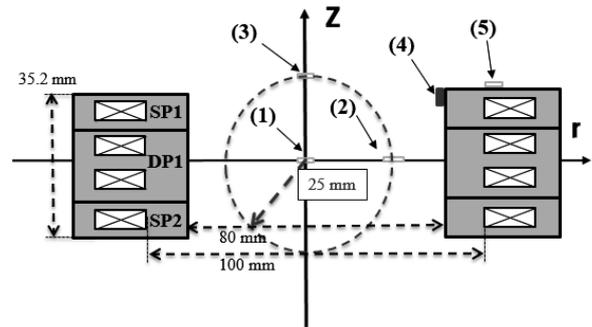


Fig.1 Schematic layout of the multiple-coil model and measurement point (1)-(5).

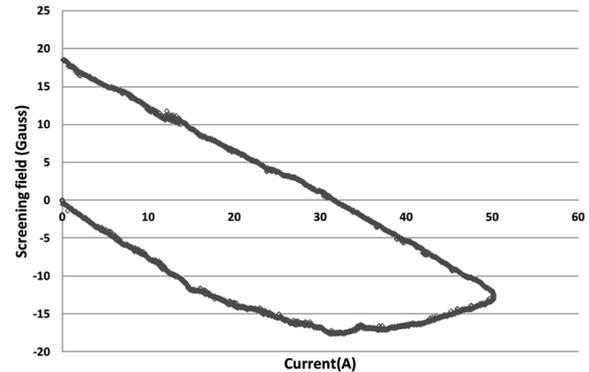


Fig.2 Hysteresis of magnetic field generated by screening current at Hall probe (1).

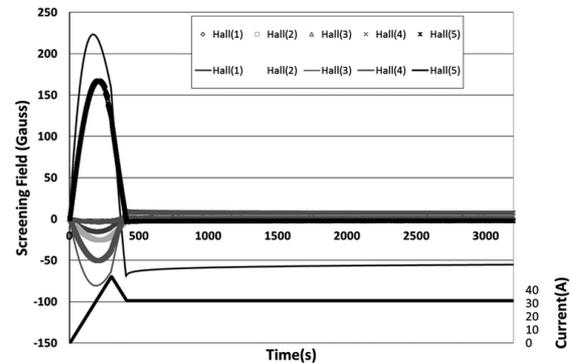


Fig.3 Experimental and numerical magnetic field generated by screening currents with overshoot of 56.3%.

### 参考文献

1. T. Tosaka, et al.: Abstracts of CSJ Conference (2016).
2. H. Ueda, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 23, 4100805 (2013).

# 高磁場 MRI 用高温超電導磁石の開発(‘16 年春) —9.4 T ヒト全身用 MRI コイルの最適化設計と不整磁場評価—

HTS magnet R&D project for ultra-high field MRI (2016 spring)

— Optimal configuration design and numerical evaluation on irregular field in REBCO coil  
for 9.4-T human-whole-body MRI —

植田 浩史(早大/岡山大); 野口 聡(早大/北大); 石山 敦士(早大);  
岩井 貞憲, 戸坂 泰造, 宮崎 寛史, 野村 俊自, 来栖 努(東芝); 浦山 慎一, 福山 秀直(京大);  
UEDA Hiroshi (Waseda Univ./Okayama Univ.); ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.);  
NOGUCHI So (Waseda Univ./Hokkaido Univ.); IWAI Sadanori, TOSAKA Taizo, MIYAZAKI Hiroshi, NOMURA Shunji,  
KURUSU Tsutomu (Toshiba); URAYAMA Shinichi, FUKUYAMA Hidenao (Kyoto Univ.);  
E-mail: hiroshi.ueda@okayama-u.ac.jp

## 1. はじめに

我々は、日本医療研究開発機構(AMED)の未来医療を実現する医療機器・システム研究開発事業「高磁場コイルシステムの研究開発」で、10 T 級(9.4 T)の REBCO コイルを用いたヒト全身用 MRI の実現を目指してきた[1]。REBCO コイルにおいては、REBCO 線材がテープ形状をしているため、遮蔽電流が顕著に誘導され、それによって生じる不整磁場がコイルの発生磁場の空間的均一性や時間的安定性を損なうことが知られている。したがって、設計の段階で不整磁場を出来るだけ抑えるために、不整磁場の影響を出来るだけ正確に計算・評価し、その情報をもとに、不整磁場の発生を抑制するようコイル形状や配置の再設計を行う、という設計プロセスが必要となる。これまでに、高均一磁場発生コイルの形状最適化設計を行い、通電領域がパンケーキコイル断面や REBCO 線材の超電導層によって均一度が著しく異なることを明らかにした[2]。また、遮蔽電流磁場については数値解析による評価を実施し、実験によって解析の妥当性を確認した[3]。今回は、上記プロジェクトで設計・検討を行った実規模(1000 mmφ, 9.4 T 級ヒト全身用)コイルを対象として、不整磁場が撮像空間の磁場均一度に与える影響についてコイル設計の点から評価・考察したので報告する。

## 2. 最適化設計

Y 系コイルの最適化設計手法[2]を用いて、ヒト全身用高磁場 MRI コイルを設計した。なお、設計条件は以下の通りである。中心磁場: 9.4 T, コイル内半径: 1.0 m, FOV: 40 cm, 5 ガウスライン:  $r = 3.5$  m,  $z = 6.0$  m, フープ力: 500 MPa 以下, Y 系線材: 4 mm 幅, 0.1 mm 厚, パンケーキ間隔: 0.8 mm の条件下で、線材使用量を最少化した。

Fig. 1 に最適化設計された Y 系コイルの断面図, Table 1 に諸元を示す。Coil 4 および Coil 5 はアクティブシールドである。Table 2 に設計された MRI 磁石の不整磁場を示す。最大で、8 次に約 22 ppm の不整磁場が発生している。

## 3. 遮蔽電流磁場解析

REBCO 線材の厚み方向で電磁場が一様とする近似を用いて、積分方程式、高速多重極法や超電導特性を考慮可能な非線形有限要素法を組み合わせた三次元電磁場数値解析を用いて遮蔽電流磁場の計算を行った[3]。上述の設計に対して、解析では、実際の巻き方を考慮してダブルパンケーキコイルの積層構造とし、超電導層にのみ電流が流れるとした。運転温度は 20 K,  $n$  値は 20 一定とした。全コイルを同時励磁するとした。遮蔽電流が作り出す不整磁場を計算した後、球面調和関数展開を用いて、磁場均一度に与える影響を評価した。遮蔽電流磁場の影響とコイル形状・配置についての詳細は当日報告する。

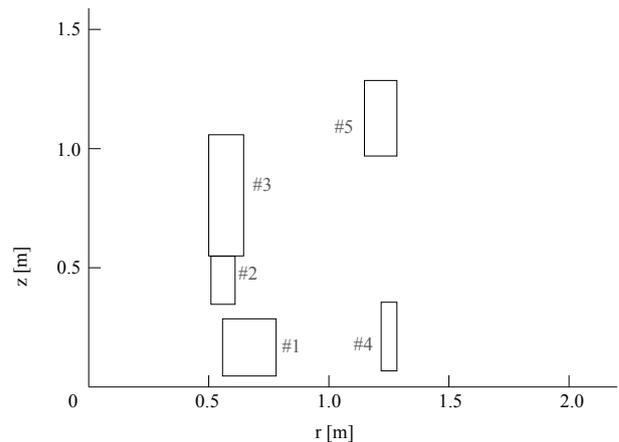


Fig. 1. Cross-sectional drawing of optimal designed 9.4-T MRI coil.

Table 1. Specifications of model magnet

	Coil 1	Coil 2	Coil 3	Coil 4	Coil 5
Inner diameter (m)	1.115	1.019	1.000	2.436	2.297
Outer diameter (m)	1.560	1.219	1.291	2.567	2.297
Number of turns / SP coil	314	156	225	101	77
Number of SP coils	50×2	42×2	106×2	60×2	66×2
Gap between turns (mm)	0.550	0.482	0.485	0.488	1.595
Gap between SP coils (mm)			0.8		
Gap between split coils (mm)	92.590	694.82	1099.5	134.76	1938.5
Operating current (A)			253.717		
Magnetic field @center (T)			9.381		

Table 2. Irregular magnetic field.

Order	2	4	6	8	10
Inhomogeneity (ppm)	11.001	11.592	-5.671	-22.260	4.866

## 謝辞

本研究は、日本医療研究開発機構の未来医療を実現する医療機器・システム研究開発事業「高磁場コイルシステムの研究開発」を通じて実施された。また、解析コードの開発は科研費基盤研究 C (25420253) に依ったことを付記する。

## 参考文献

1. T. Tosaka, et al.: *Abstracts of CSJ Conference*, Vol.93 (2016) 1A-a01.
2. S. Noguchi, et al.: *Abstracts of CSJ Conference*, Vol.91 (2015) 3A-p16.
3. H. Ueda, et al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol.26 (2016) 4701205.

# 高磁場 MRI 用高温超電導磁石の開発(16 年春)

## — 工業製品化を前提とする MRI 用 REBCO コイルシステムの開発 —

### HTS magnet R&D project for ultra-high field MRI (2016 spring)

#### - Development of REBCO coil system premised on commercial reality -

石山敦士(早大); 植田浩史(早大/岡山大); 野口聡(早大/北大); 浦山慎一, 福山秀直(京大);  
宮崎寛史, 戸坂泰造, 野村俊自, 来栖 努(東芝)

ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.); UEDA Hiroshi (Waseda Univ./Okayama Univ.);  
NOGUCHI So (Waseda Univ./Hokkaido Univ.); URAYAMA Shinichi, FUKUYAMA Hidenao (Kyoto Univ.);  
MIYAZAKI Hiroshi, TOSAKA Taizo, NOMURA Shunji, KURUSU Tsutomu (TOSHIBA)  
E-mail: atsushi@waseda.jp

### 1. はじめに

日本医療研究開発機構 (AMED) の未来医療を実現する医療機器・システム研究開発事業「高磁場コイルシステムの研究開発」において、10 T 級 (9.4 T) REBCO コイルを用いたヒト全身用高磁場 MRI の実現を目指し研究開発を行ってきた。本プロジェクトでは、MRI 用としての REBCO コイルシステムの設計・製造・運転の各段階における開発課題を明確にし、これらを一つ一つ克服していくための方策を、精密な数値解析と試作・実験により検証・確立していき、最終的に核磁気共鳴信号による磁場均一度や時間安定度の評価、MRI 画像による評価までを実施するという計画を立てた。プロジェクト終了に当たり、本プロジェクトの開発方針・進め方を振り返り、今後の研究開発の方向性を考えるための問題提起としたい。

### 2. プロジェクトの目標・進め方

Fig.1 に REBCO 線材開発からコイル化技術、そして工業製品化までの大まかな技術開発の流れを示す。「工業製品化」の意味を一義的に定義することはできないが、少なくともここでは、MRI 用コイルシステムとして、「i)安全性・信頼性・利便性を考慮・確保しつつ、ii)要求される機能(高磁場・高精度磁場・高磁場安定性)を有するコイルシステムを設計できること、iii)設計通りのコイルシステムを製造できること、iv)最終的に適正な磁場補正ができ、目的とする核磁気共鳴信号・MRI 画像を得ることができること、v)設計通りの MRI 用コイルシステムが繰り返し製造できること」とした。そして本プロジェクトをはじめめるにあたり、「9.4T-MRI 装置用 REBCO コイルシステムを工業製品として成り立たせることを前提・眼目とする」ことを決め、Fig.2 に示すグループが組織され、以下の技術課題設定のもと研究開発を行ってきた。

#### I. 10T/メートル級口径 MRI 用磁石の設計基盤技術

- ①MRI 撮像に必要な高精度磁場発生技術
  - a.遮蔽電流による不整磁場対策
  - b.コイル巻線精度、冷却・励磁時の熱および電磁応力による変形対策
  - c.電源起動による磁場安定性対策
- ②MRI 用磁石の設計最適化のための設計技術
  - a.高磁場・高電流密度・高機械強度化によるコンパクト設計技術
  - b.コイル保護・安定化設計
  - c.マルチコイル設計技術

#### II. 10T/メートル級口径 MRI 用磁石の製造基盤技術

- a.高精度磁場発生を実現する磁石の製造技術
- b.高磁場・高電流密度・高機械強度磁石の製造技術
- c.安全・安定運転を実現する磁石の製造技術 (含む冷却技術)
- d.マルチコイルの製造技術
- e.目的とする MRI 撮像を可能とする MRI システムの製造技術

例えば、設計技術の開発を例に採ると、従来のコイル設計 (丸線・密巻) においては、Fig.3(a)に示すようにコイル断面において一様な電流密度を仮定することができたが、REBCO コイル (パンケーキ巻を想定) では、まず同図(b)のようにパンケーキ毎に分割する必要があること、さらに同図(c)のようにテープ線材の構成をも考慮しなければ目的とする磁場精度の設計ができないことを定量的に評価・検証し、その結果を設計最適化・コイル製造技術に活かすというアプローチを行ってきた。

わずか3年という短い期間であったが、MRI 用として機能させるためのコイル設計・製造基盤技術の確立という目的はある程度達成できたと考える。

### 3. まとめ

MRI 用に限らず、REBCO コイル開発は、基礎・基盤技術の確立のための研究をしている段階から、実際の応用実現を可能とする技術開発、そして、それらに基づいて工業製品として設計・製造するための技術開発のステージに引き上げていかなければならない段階に至ったと考える。コイル化技術の現状を見極め、今後の研究開発の力点・方向性・進め方を決めていく必要がある。

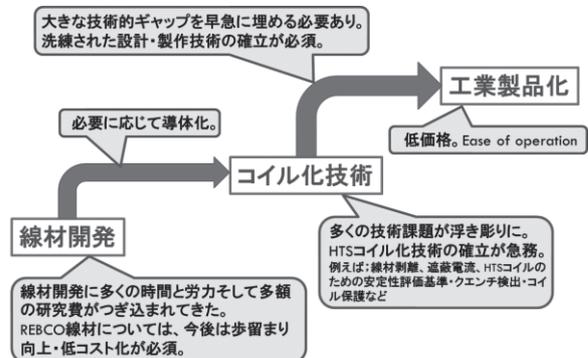


Fig.1 Development of REBCO coil system premised on commercial reality



Fig.2 R&D organization

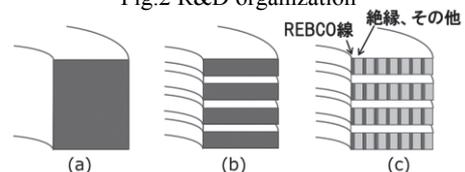


Fig.3 Cross-sectional drawings of coil windings

# 高磁場中におけるパラフィン含浸/エポキシ含浸 REBCO レイヤー巻コイルの劣化特性

## Degradation of paraffin- and epoxy- impregnated layer-wound REBCO coils in high fields

柳澤 吉紀(理研); 梶田 健太朗, 井口 聖威也, 上野 健志, 高尾 智明(上智大); 名和 雅斗, 許 一, 中込 秀樹(千葉大);

松田 徹郎, 岡村 哲至(東工大); 濱田 衛(JASTEC); 松本 真治, 野口 隆志, 西島 元(NIMS);

末松 浩人(JEOL RESONANCE); 朴 任中, 高橋 雅人, 前田 秀明(理研)

YANAGISAWA Yoshinori (RIKEN); KAJITA Kentaro, IGUCHI Seiya, UENO Takeshi, TAKAO Tomoaki (Sophia Univ.);

NAWA Masato, XU Yi, NAKAGOME Hideki (Chiba Univ.); MATSUDA Tetsuro, OKAMURA Tetsuji (Tokyo Tech);

MAMORU Hamada (JASTEC); MATSUMOTO Shinji, NOGUCHI Takashi, NISHIJIMA Gen (NIMS);

; SUEMATSU Hiroto (JEOL RESONANCE); PIAO Renzhong, TAKAHASHI Masato, MAEDA Hideaki (RIKEN)

E-mail: yoshinori.yanagisawa@riken.jp

### 1. はじめに

1.3 GHz 級 NMR 磁石の実現には、30 T を超える高磁場を発生し、なおかつ高い磁場均一度を得るための HTS コイル技術が必要となる。この観点から、整列巻線した REBCO レイヤー巻コイルにおける強い電磁力による劣化特性の把握が重要であるが、十分には明らかになっていない。本報では、パラフィンワックス含浸とエポキシ塗り込み含浸の REBCO レイヤー巻コイルの LTS 磁石の高磁場中での特性を比較し、劣化の振る舞いの違いを明らかにする。

### 2. 実験方法

#### 2.1 パラフィン(ワックス)含浸 REBCO コイル

昨年秋の学会で報告したコイル(#1)における劣化[1]への対策を施したコイル(#2)を製作した(Table 1 参照)。巻線内の半田によるブリッジ接続部の応力集中による劣化を防ぐために、上部フランジに剛性の高い中間電極を設け、巻線中に線材を引き出して半田付けする方式をとった。また、コイル軸方向の電磁力によって最外層の線材が動き変形して劣化することを防ぐために、最外層の周りに巻線と同じ線を数層バインドし、さらに真鍮線でバインドした。このコイルを高強度 Bi-2223 コイル[1]と直列接続し 4.2K、17 T の磁場中で励磁した。

#### 2.2 エポキシ含浸 REBCO コイル

ポリイミド電着した REBCO 線材で小型のレイヤー巻コイルを製作した(Table 1 参照)。真空含浸では巻線内部に十分にエポキシが浸透しなかったため[2]、塗り込み含浸を採用した。巻棒と巻線の間にはテフロンシートを介し、機械的に分離する方式とした。このコイルを 4.2 K、11 T の磁場中で励磁した。

### 3. 実験結果

#### 3.1 パラフィン(ワックス)含浸 REBCO コイル

昨年報告[1]したコイル(#1)と比べ特性が向上したものの、Fig. 1 に示すように 180 A (BJR 166MPa) において徐々に電圧が立ち上がり始めた。ホールドを繰り返しながら励磁を続け 285 A、27.6 T まで到達した。その後、さらに励磁をつづけたところ、電流上昇中の 288 A において熱暴走が起きた。これに伴い 17 T 磁石はフルクエンチした。試験後 REBCO コイルを巻き戻したところ、コイル最下部に焼損が多数みられた。

#### 3.2 エポキシ含浸 REBCO コイル

Fig. 2 に示すように、400 A (BJR 440MPa) まで電圧が立ち上がりながら良好な特性が得られたが、408 A において急激に電圧が上昇した。その後消磁したところ、不可逆な電圧を示し、250 A において元の電圧-電流カーブに戻った。試験後、巻線を巻棒から取り外したところ、最内層において変形が見られた。

### 4. 考察

コイル寸法などによる差異を考慮する必要があるが、試験した 2 個のコイルには電磁力に対する劣化の振る舞いに明確な差が見られた。パラフィン含浸コイルでは、強い電磁力に対して線材が独立に振る舞うため、半田接続や最外層といった境界部の線材が変位し応力集中を起こすことで、想定より大幅

に低い電流値においても劣化しやすい。今回のコイルでは、これらの対策を施したが、コイル下部において線材が動き、劣化して熱暴走に至ったと考えられる。一方、エポキシ含浸の場合、強い電磁力に対して巻線全体が剛体として振る舞うので、線材の長手方向への高い引張耐性から想定されるコイル特性が得られやすい。ただし、今回のコイルでは、巻線厚が約 1mm と薄いため円筒としての剛性が低く、強いフープ応力により線材の円筒の変形と折れ曲がりが起こり、劣化したと推察される。

謝辞 本研究は科学技術振興機構(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-イノバ)の支援によって行われた。

### 参考文献

[1] K. Kajita, et al., IEEE TAS 26, 4301106 (2016)

[2] 松田他, 2015 年度秋季低温工学 1B-a04

Table 1 Coil parameters

Parameters	Paraffin (#2)	Epoxy
Coil i.d. / o.d. (mm)	40 / 68	79 / 81
Coil height (mm)	210	93
Total number of turns	3850	92
Number of layers	76	4

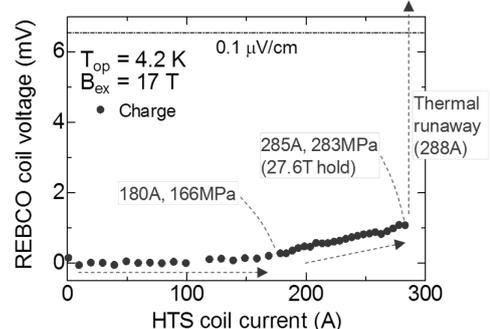


Fig. 1 パラフィン含浸 REBCO レイヤー巻コイルの 17T 磁場中における電圧-電流特性(銅電極の抵抗成分を除去したホールド電圧を、電流値ごとに平均化処理した)

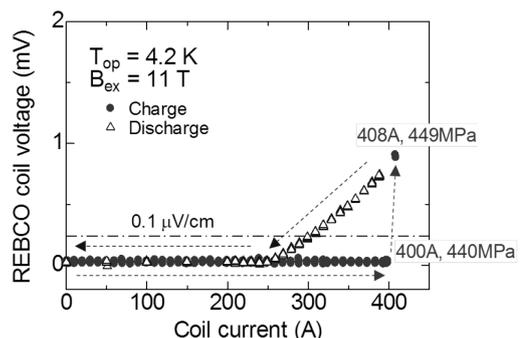


Fig. 2 エポキシ含浸レイヤー巻 REBCO コイルの 11T 磁場中における電圧-電流特性(銅電極の抵抗成分を除去したホールド電圧)

## 伝導冷却型 REBCO マグネットの冷凍機停止後における保冷特性評価

## Cold storage of the conduction-cooled REBCO magnet in case with loss of cooling function

岩井 貞憲, 宮崎 寛史, 戸坂 泰造, 田崎 賢司, 野村 俊自, 石井 祐介 (東芝)

IWAI Sadanori, MIYAZAKI Hiroshi, TOSAKA Taizo, TASAKI Kenji, NOMURA Shunji, ISHII Yusuke (TOSHIBA)

E-mail: sadanori.iwai@toshiba.co.jp

## 1. はじめに

伝導冷却型の超電導マグネットにおいて、冷却能力が低下したり、冷凍機が故障したりするなどのトラブルが発生すると、コイルへの熱侵入が増加し温度が上昇する。コイルを保護するため、温度をモニタしながら熱暴走しない範囲で運転する方法(予防保全)が考えられるが、運転限界温度に達するまでの時間が短い場合、磁場の使用状況にかかわらず消磁せざるを得ない。REBCO 線材は幅広い温度で高い臨界電流特性を持つことから、温度マージンを大きくとれば冷凍機停止後も一定時間運転を継続できる。今回、保冷時間の延長を目的として、冷却ステージとコイルとの間の熱抵抗をコントロールした伝導冷却型の REBCO マグネットを試作した。本発表では、伝導冷却の構成と、本構成での通電試験結果、および冷凍機停止後の保冷試験の結果について報告する。

## 2. 伝導冷却構成

Table 1 に試験に用いた REBCO コイルの諸元を示す。レーストラック型のシングルパンケーキコイルを 4 積層した構成であり、冷却時の熱応力による劣化対策として、Fig. 1 に示すようにフッ素樹脂でコーティングしたポリイミドテープを共巻きし、ターン間の接着を弱めた [1]。また、各積層層間には高純度のアルミ板を挿入して均熱化を図った。積層コイルの上下面には熱抵抗をコントロールする部材として、GFRP 製の固体断熱層を接着し、これらを金属製のケース内に収納し、ケース内を樹脂含浸することで、構成部材を一体化させた。ケースと単段冷凍機との間は、高純度アルミ製の伝熱板で熱的に接続しており、REBCO コイルはケースと固体断熱層を介して間接的に伝導冷却される。

## 3. 試験結果

## 3.1. 通電試験結果

本伝導冷却構成での REBCO コイルの健全性を確認するため、クライオスタットに組み込み、伝導冷却下での通電試験を実施した。通電結果を Fig. 2 に示す。 $10^{-9} \sim 10^{-7}$  V/cm の範囲で算出したコイル n 値は、24~28 と伝導冷却下でも良好な超電導特性を示しており、特性劣化が無いことを確認した。

## 3.2. 冷凍機停止後の保冷試験結果

本マグネットの保冷特性を検証するため、故意に冷凍機を停止させ、冷凍機とケース、コイルの各温度の時間変化を測定した。結果を Fig. 3 に示す。初期温度を 23 K から、約 30 分後、冷凍機は 57 K に達したが、ケースは 50 K、コイルは 44 K までの温度上昇に抑えられており、コイルと冷凍機との間の熱抵抗のコントロールにより、本構成が冷凍機停止後の保冷に有効であることを確認することができた。

## 4. まとめ

保冷時間の延長を目的として、冷却ステージとコイルとの間の熱抵抗をコントロールした伝導冷却型の REBCO マグネットを試作した。ケースと固体断熱層を介して、コイルを間接的に伝導冷却する構成により、冷凍機停止後の保冷に成功した。また、本構成においても、劣化の無い健全な超電導特性が得られていることを確認した。引き続き、実運転を想定した通電状態からの冷凍機停止試験を行う予定である。

## 参考文献

1. S. Iwai, et al., Abstracts of CSSJ Conference, Vol.92 (2015) p.182

Table 1 Specification of REBCO coil

Parameter	Value
Tape width (mm)	4
Tape thickness (mm)	0.1
Tape $I_c$ (77 K, s.f.) (A)	98~134
Tape length (m)	244
Inner diameter (mm)	200
Outer diameter (mm)	258
Straight length (mm)	280
Number of turns/pancake	190
Number of pancakes	4

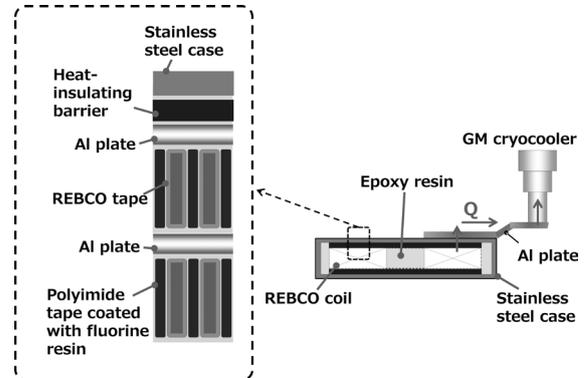


Fig. 1 Schematic of REBCO magnet

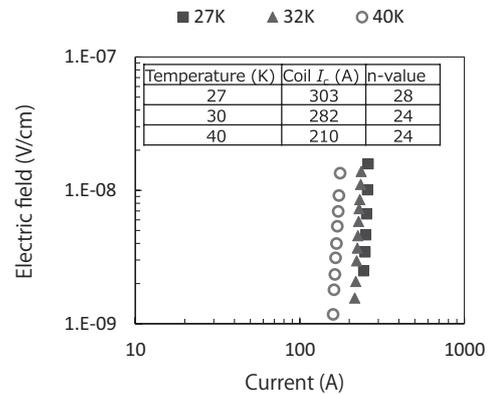
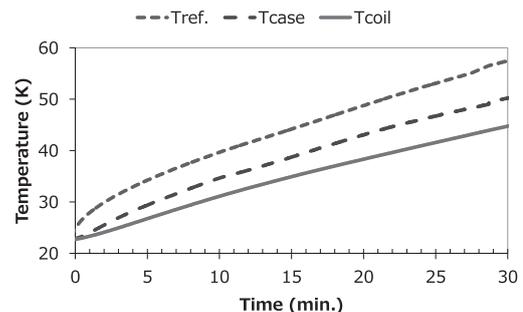
Fig. 2  $V-I$  characteristics of the REBCO coil

Fig. 3 Cold storage characteristics of the REBCO magnet

# 浮上式鉄道用 RE 系高温超電導磁石の開発

## - 700 kA レーストラックコイル製作 -

### Development of REBCO HTS Magnet for Maglev

## - Fabrication of 700 kA Racetrack Coil -

水野 克俊, 杉野 元彦, 田中 実, 小方 正文(鉄道総研)

MIZUNO Katsutoshi, SUGINO Motohiko, TANAKA Minoru, OGATA Masafumi (RTRI)

E-mail: mizuno.katsutoshi.14@rtri.or.jp

### 1. はじめに

鉄道総研では、希土類系高温超電導線材(以下 REBCO 線材)の磁場中での優れた通電特性に着目し、浮上式鉄道への応用を検討している。液体ヘリウム等の寒剤が不要となるので運用が容易になるだけでなく、車載磁石の小型軽量化や冷凍機の消費電力低減、50 K 程度で運用することでふく射シールドを省略可能となる等の利点もある。ふく射シールドがなくなることにより、超電導コイル-地上コイル間のギャップが縮小されるので、電磁力特性の向上(浮上開始速度低速化や浮上力の向上)も期待できる[1]。そこで、実機級の起磁力 700 kA を発生可能な REBCO コイルを製作し、励磁試験を実施したのでその結果を報告する。

### 2. パンケーキコイル製作

700 kA レーストラックコイルはシングルパンケーキコイル 8 積層の構成となっており、2014 年度に製作した 2 コイル[2]に加えて、6 個新たに製作した。すべてのコイルは熱可塑性樹脂を用いた手法で作られており、パンケーキコイル側面に伝熱のための無酸素銅板が熱可塑性樹脂の融着によって取り付けられている。製作したコイルの特性確認のため、液体窒素中で通電して  $I_c$  を測定した(Fig.1)。

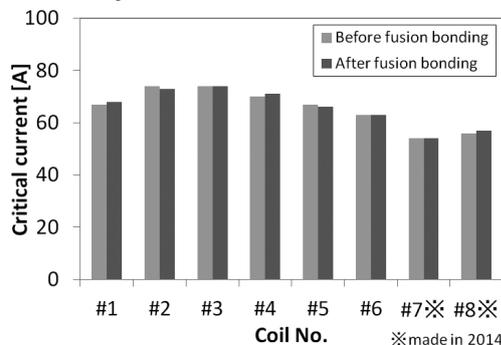


Fig.1 Critical currents of pancake coils at 77 k, s.f.

すべてのコイルで融着前後の有意な  $I_c$  の変化は見られず、 $n$  値も 20 以上であったため、熱応力による劣化は発生していないことが確認できた。線材には SuperPower 社製 SCS6050-AP を用いており、2015 年度製作分の方が 2~4 割ほど高い  $I_c$  を示しているが、コイル設計および製作手法については 2014 年度から変更しておらず、線材自体の通電性能の向上に由来するものである。

### 3. 700 kA 励磁試験結果

製作したパンケーキコイルをすべて積層し、アルミ合金製のコイルケースに収めた状態で、伝導冷却下で励磁試験を実施した。コイルの諸元は Table 2 のとおりであり、250 A 通電時に起磁力 700 kA となる。

なお、予め 2014 年度製のパンケーキコイルに用いた線材で通電特性評価試験を行っており、磁場解析と合わせて負荷率を予想している。コイル温度 36 K、通電電流 250 A のとき負荷率 90 % となったものの、2015 年度線材は通電性能が向上し

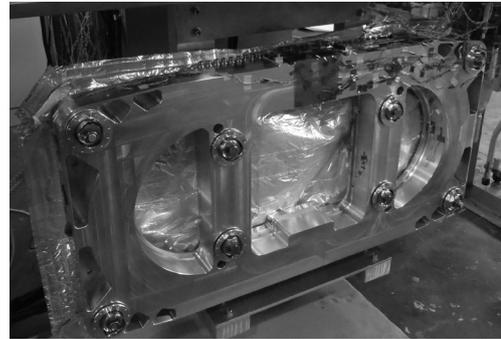


Fig.2 700 kA racetrack coil

Table 1 Specifications of 700 kA racetrack coil

Number of turns	2800
Length of the conductor	7600 m
Inductance	12 H
Operating current	250 A
Weight (with the coil case and heat transfer members)	Approx. 140 kg

ており、2014 年度製のパンケーキコイルを負荷率の低いコイル積層中心(4, 5 段目)に配置している。そのため、励磁の上限度は 40 K 前後になると推測される。励磁試験は、予想される上限度(40 K)から余裕を持たせて、35 K に温調した状態で行った。250 A 通電(起磁力 700 kA)で約 40 分間ホールドし、安定して磁場が発生できていることを確認した。市販線材の性能では 700 kA 励磁の上限度は 40 K 程度であるが、現在の研究開発線材は約 50 K で励磁可能な通電性能を有しており[3]、近い将来 50 K にて余裕を持って運用できる線材が市販されると考えられる。

また、起磁力の確認のため、レーストラック曲線部中心とレーストラック中心軸上にホール素子を配置している。700 kA 励磁時の磁束密度はそれぞれ 1.4 T, 1.1 T となっており、解析と一致しており、遮蔽電流の影響はホール素子では確認できない程度であった。励磁時の詳細データや 750 kA 励磁試験の結果は当日報告する。

本研究は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施した。

### 参考文献

- [1] 渡邊健ら:「希土類系高温超電導磁石の搭載を想定した車両運動特性」鉄道総研報告, Vol. 29 (2015) p.5-10.
- [2] K. Mizuno, et al., Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 91 (2015) p.133.
- [3] 例えば, R. Nakasaki, et al., Continuous improvements in performance and quality of 2G HTS wires produced by IBAD-MOCVD for coil applications, presented at MT24.

# REBCO 線材を用いた閉ループコイルにおける磁束クリープの影響

## The effect of flux creep in the closed loop coil using REBCO tape

長谷 友哉, 淡路 智, 渡辺和雄(東北大); 小黒 英俊(東海大); 山野 聡士(古河電工)  
 HASE Tomoya, AWAJI Satoshi, WATANABE Kazuo (Tohoku Univ.); Oguro Hidetoshi (Tokai Univ.);  
 YAMANO Satoshi (Furukawa Electric)  
 E-mail: tmy-hs@imr.tohoku.ac.jp

### 1. はじめに

高温超伝導線材を用いた, MRI用コイルの開発が期待されている。そのためには, 永久電流モードを可能にする, 超伝導接続技術を開発する必要がある。これまでに REBCO 線材の超伝導接続が数例報告されているが, いまだ実用には至っていない[1, 2]。最近, 東北大と古河電工は  $10^{-12} \Omega$  程度の超伝導接続技術と高温超伝導線材永久電流スイッチを開発し, 20 Kにおいて 100 Aの永久電流運転に成功している[3]。しかし, 電流電圧特性が複雑で, 磁束クリープの影響も大きい高温超伝導線材における磁場安定性に関しては, 接続抵抗以外の本質的な磁場安定性について十分理解されていない。本研究では, 超伝導接続以外のコイルの磁場減衰への影響を考えるために, 接続のない閉ループコイルを作製し, 磁束クリープが磁場減衰に与える影響を調べた。

### 2. 実験方法

本研究で用いるコイルは, 文献[4]を参考に作製した。6 mm幅 300 mm長の古河 SuperPower社製 REBCOテープ線材中央長手方向に両端を残してレーザーカット加工を施し, ボビンに3ターン巻き付けた。伝導冷却クライオスタットを用い, 磁場中冷却を行い, 外部磁場減磁後にコイル中心の捕捉磁場の減衰をホール素子により測定した。

### 3. 実験結果

図1にコイル中心の捕捉磁場の減衰を示す。9 Kにおいて, 0.15 Tで磁場中冷却後, 外部磁場を減磁した結果, 88 mT程度の磁場を捕捉した後, 約 24 時間磁場減衰を測定した。磁場の減衰率は 10 時間あたり(50600~86600 sec)  $3.4 \times 10^{-7} \text{ sec}^{-1}$  となり, 磁場の減衰を, 等価抵抗とみなすと, 緩和時間  $\tau = L/R$  より  $4.3 \times 10^{-15} \Omega$  と見ることが出来る。[3]の結果と比べて, 抵抗値は 3 桁低く, 9 Kにおいては磁束クリープによる磁場減衰は十分小さいと考えられる。

### 4. E-J特性

図1の結果から, 測定した磁場と外部磁場の差分の磁場をビオ・サバールの式より電流に変換し, 磁場の減衰率から発生電圧を求めた。図2に得られた E-J 特性を示す。Jの大きい部分で負傾きを有する E-J 特性が得られているのは, 磁場減衰に伴う誘起電流の上昇に相当する。その部分を除くと,  $10^{-10}$ - $10^{-9}$  V/mの範囲でほぼ指数関数的な振る舞いが得られている。 $1 \times 10^{-10}$ - $3 \times 10^{-9}$  V/mの領域から求めた n 値は 42 となった。

### 5. まとめ

無接続コイルを用いて, 本質的な磁場緩和特性を評価した。10 K近傍においては, 等価抵抗  $10^{-15} \Omega$  となり, 十分低い緩和率が得られることが分かった。当日は温度依存性についても議論する予定である。

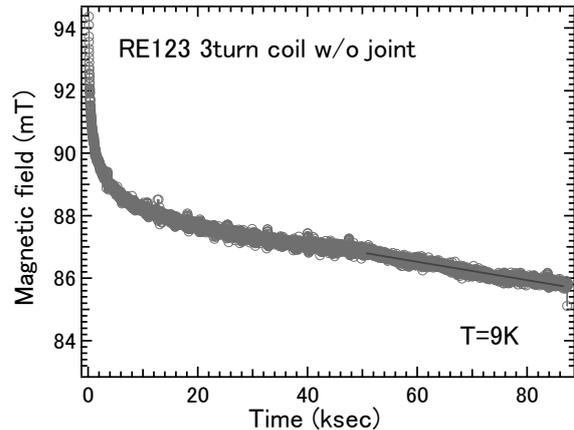


Fig. 1 Decay of the magnetic field at the center of sample coil measured by a Hall sensor

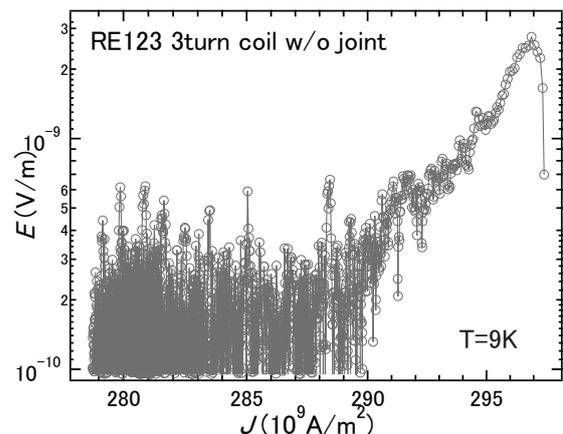


Fig. 2 Electric field - Current density properties at 9 K

### 参考文献

1. Y.J.Palk, *et al.*: NPG Asia Mater., Vol.6 (2014) p.e98
2. X.Jin, *et al.*: Supercond. Sci. Technol., Vol.28(2015) p.075010
3. 古河電工 HP  
[https://www.furukawa.co.jp/what/2016/kenkai\\_160427.htm](https://www.furukawa.co.jp/what/2016/kenkai_160427.htm)
4. S.Lee, *et al.*: IEEE Trans.Appl.Supercond., Vol. 23 (2013) p.4601305

# MgB2 React 線を用いた大容量撚り線導体の設計と歪分布解析

## Numerical Analysis of Strain Distribution of Twisted Multi-Strand Conductor Using MgB2 Reacted Wire

谷貝 剛, 水野 伸哉, 安藤 憲之介, 水落 空, 高尾 智明(上智大学); 榎田 康博, 新富 孝和(KEK); 平野 直樹(中部電力); 駒込 敏弘, 塚田 謙一, 山本 恵一(前川製作所); 恩地 太紀, 富田 優(鉄道総研); 宮城 大輔, 津田 理(東北大); 濱島 高太郎(前川製作所)

YAGAI Tsuyoshi, MIZUNO Shinya, ANDO Kennosuke, MIZUOCHI Sora, TAKAO Tomoaki (Sophia Univ.); MAKIDA Yasuhiro, SHINTOMI Takakazu (KEK); HIRANO Naoki (Chubu Electric Power Co., Inc.); KOMAGOME Toshihiro, TSUKADA Kenichi, YAMAMOTO Keiichi (Mayekawa MFG Co. Ltd); ONJI Taiki, TOMITA Masaru (Railway Technical Research Institute); MIYAGI Daisuke, TSUDA Makoto (Tohoku Univ.); HAMAJIMA Takataro (Mayekawa MFG Co. Ltd)  
E-mail: tsuyoshi-yagai@sophia.ac.jp

### 1. はじめに

水素タービンによるクリーンな発電など、水素社会の到来が現実味を帯びる中、再生可能エネルギー由来の液体水素を大量に輸入し、多くの場所で液体水素を燃料として、また冷媒として利用できる環境の整備は今後益々加速すると考えられている。

MgB2 線は、液体水素温度以上で超電導特性を示すため、液体水素を冷媒として用いる超電導機器への応用が期待されている。線材は、すでに Columbus 社、Hyper tech 社が市場への供給を行っており、その性能向上は著しい。また、今後コスト削減が見込めることから、電力貯蔵マグネットを構成する大容量導体への適用が期待されている。熱処理を行っていない線材の大容量導体では劣化もほとんどなく[1]、4%程度の曲げ歪みまで許容される。しかし熱処理済み MgB2 線は、曲げ歪に対して敏感であり、Columbus 社製熱処理済みの線材の場合、コイル巻き線の最小許容曲げ半径は 100mm である。これは直径素線 1.13mm の曲げ歪に換算して 0.56%となる。熱処理ポビン半径 250mm から直線に伸ばして撚り線・巻き線工程を経る事を考慮すると、許容曲げ歪は約 0.3%と考えられ、大容量導体への応用報告例はない。電気機器用マグネットへの応用には、大容量導体の開発およびコイル化技術開発が急務である。そこで本研究は、電力貯蔵用ダブルパンケーキコイルを構成する場合、そのコイル仕様と撚り線導体の撚りピッチをパラメータとして、最大曲げ歪の分布を計算し、導体およびコイル仕様的设计尤度を求めた。

### 2. 素線および導体の仕様

MgB2 素線は Columbus 社製で直径は 1.13mm である。素線の構造は、直径約 0.1mm のフィラメントが 12 本、撚りピッチ 300mm で同軸状に撚られており、熱処理ポビン半径 250mm ですでに熱処理済みである。これを直径 1.75mm の CuNi コアの周りに 8 本配置して、任意の撚りピッチで撚り線導体を構成する。

### 3. 曲げ歪算出のための素線軌道算出

図1は、同軸撚り線導体を用いたパンケーキコイルにおける、素線軌道を求めるための、パラメータ表記を示した模式図である。

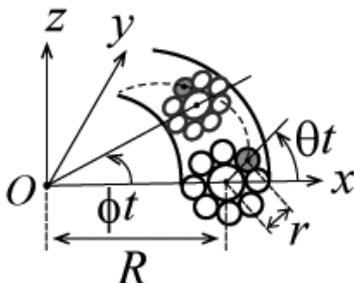


Fig.1 Schematic of coordinate to define the strand positions

素線の軌道は、大半径と小半径を各々  $R, r$  とするヘリカル軌道になる。 $t$  をパラメータ、トロイダル角を  $\phi t$  ポロイダル角を  $\theta t$  とした時、素線の曲率半径  $\rho$  は、次の式で表すことが出来る。

$$\frac{1}{\rho^2} = \frac{\theta^6 r^4 + \theta^4 \phi^2 [r^4 (3 + \sin^2 \theta) + 4r^3 R \cos \theta + r^2 R^2] + \theta^2 \phi^4 r (R + r \cos \theta)^2 (3r + r \sin^2 \theta + 2R \cos \theta) + \phi^6 (R + r \cos \theta)^4}{[\theta^2 r^2 + \phi^2 (R + r \cos \theta)^2]^3} \quad (1)$$

計算機を用いて曲げ半径を評価する場合、素線軸方向に 1mm 間隔で離散化され、その 2 階微分によって曲率半径を評価した。これと素線半径を用いる事によって、素線長手方向の曲げ歪み分布を詳細に解析した。

### 4. 計算結果と考察

図2は、コイル直径(上段:内径、下段:外径)を横軸、導体撚りピッチを縦軸に取り、それらの条件において素線が経験する最大曲げ歪みを等高線表示したものである。

製作予定のダブルパンケーキコイルの内径は、450mm であり、素線の許容曲げ歪み範囲内でコイルを構成するためには、同軸撚り線導体の素線撚りピッチは 120mm 以上必要である事がわかる。今後はこの結果を基に導体、コイル製作を行い、コイルとしての特性評価を行う予定である。

なお本研究は、科学技術振興機構 先端的低炭素化技術開発 (ALCA) の助成を受けて行われている。

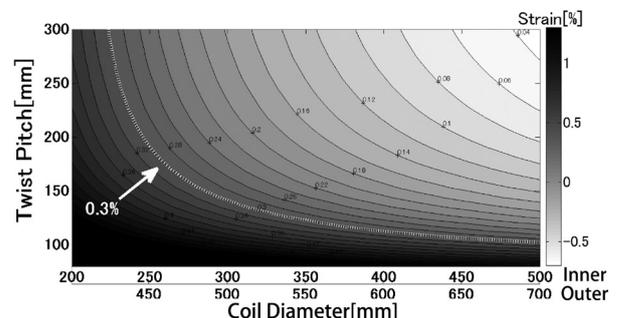


Fig.2 Contour plot of maximum bending strain distribution of reacted MgB2 wire as functions of coil diameter and twist pitch of co-axial twisted conductor.

### 参考文献

1. M.S.A.Hossain, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 24, No. 5 (2014) #6200304

# 無絶縁 REBCO パンケーキコイルにおける熱的安定性 -局所的常電導転移発生時の特性評価実験- Thermal Stability in No-Insulation REBCO Pancake Coil -Evaluation Experiments on Local Normal Transition Characteristic-

矢代 聡佳, 勝俣 一輝, 王 韜, 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)  
YASHIRO Satoka, KATSUMATA Kazuki, WANG Tao, ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.); NOGUUCHI So (Hokkaido Univ.)  
WATANABE Tomonori, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power Co., Inc)  
E-mail: johnny31oka@toki.waseda.jp

## 1. はじめに

無絶縁コイル(NI コイル)では、電流が常電導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示唆されている。今回は試作した内径60mmの小口径 NI コイルを対象に、ヒーター(歪ゲージ)入熱により局所的常電導転移発生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。また、ピックアップコイルにより NI コイル内の常電導転移発生を検出できるかを確認した。これら2つを報告する。

## 2. 実験方法

実験対象とした試作 NI パンケーキコイルの諸元を Table.1 に、写真を Fig.1 に示す。NI パンケーキコイルの巻線中央の30層目と45層目に、抵抗値が1000Ωのヒーター(歪ゲージ)を挿入した。Fig.1の試作 NI パンケーキコイルをパラフィンにより真空含浸した。さらに、内径60mmの NI コイルの同心軸上直上に内径60mmピックアップコイル(100回巻)を設置した。

## 3. 実験結果

先行研究[1]により、NI コイルに局所的常電導転移が起きた際の巻線内の電流の挙動が、数値解析により明らかにされている。例えば、一定電流が流れている状態(コイル周方向に電流が流れている)で、局所的常電導転移が発生すると、電流は劣化部を避けてまず隣接層に転流し、その後コイル全層にわたって伝搬していく。

試作コイルによる実験結果から、中央30層目のヒーターに10秒間入熱した時の中心磁場の変化の様子を Fig.2 に示す。横軸を時間、主軸を中心磁場、第2軸をヒーターに投入した熱量としている。中心磁場は入熱と同時に減衰している。これはヒーター周辺の周方向電流が減少し、径方向電流が増大したからだと考えられる。よって、解析上で明らかになっていた転流現象を実験的にも確かめることができた。また、ヒーター入熱を止めると中心磁場の値は復活している。つまり、NI コイル内の電流分布が局所的常電導転移発生前の状態に戻ったと言える。

45層目のヒーターに8.0Wを10秒間入熱した時の、NI コイルの両端電圧の変化とピックアップコイルで検出された誘導電圧波形を Fig.3 に示す。主軸を電圧、第2軸を Fig.2と同様にヒーター入熱量としている。磁場の変化に応じた誘導電圧が検出されており、ピックアップコイルが転流現象に反応していると考えられる。つまり、ピックアップコイルにより、NI コイル内の常電導転移発生の検出ができる可能性があることが実験的に示された。

今後は、NI コイルを積層にした場合の振る舞いについて、数値解析と実験により評価していく予定である。なお、本研究は科研費基盤研究 A(No.26249036)によったことを付記する。

## 参考文献

1. K.Katsumata, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol.92 (2015) P.93

Table.1 Specification of No-Insulation REBCO pancake coil and pick up coil

REBCO Conductor	Overall (mm)	4.02
NI Coil	Copper stabilizer thickness(μm)	20per
	Tape Ic @77K, self-field (A)	>115
	i.d; o.d (mm)	60
Pick up Coil	Height (mm)	4.02
	Turns	60
	Coil Ic @77K, self-field (A)	55
	Contact surface resistivity (μΩ · cm <sup>2</sup> )	136
	Inductance (H)	0.435
Pick up Coil	i.d; o.d (mm)	60
	Turns	100

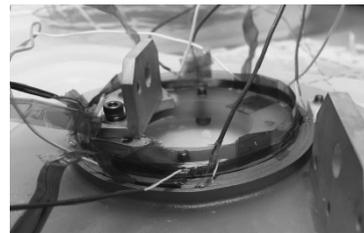


Fig.1 Picture of NI coil and pick up coil

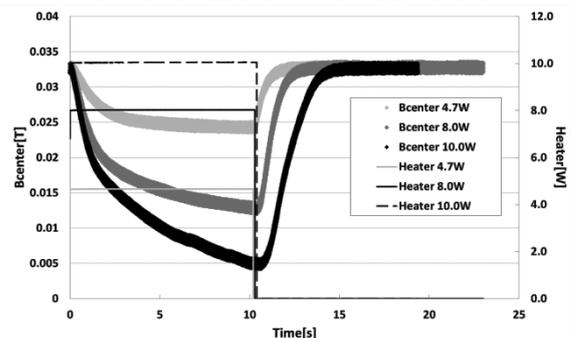


Fig.2 Attenuation of magnetic field

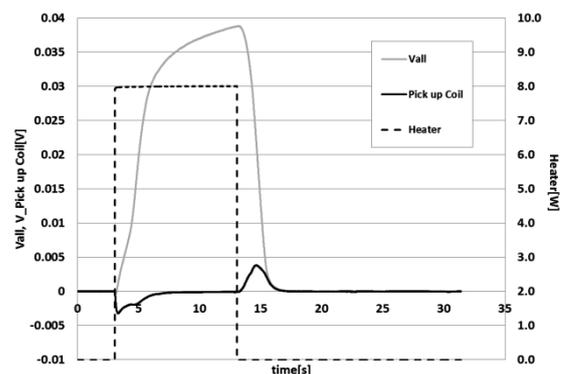


Fig.3 Detection voltage of pick up coil

# PEEC モデルによる無絶縁 REBCO ダブルパンケーキコイルにおける局所常電導転移発生時の電流分布解析

## Current Distribution Simulation of No-Insulation REBCO Double-pancake Coil on Local Normal-state Transition by PEEC Model

宮尾 亮介, 野口 聡(北大); 石山 敦士(早大)

MIYAO Ryosuke, NOGUCHI So (Hokkaido Univ.); ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.)

E-mail: miyao@em.ist.hokudai.ac.jp

### 1. はじめに

高温超電導コイルに求められる高電流密度および高安定性を同時に実現する技術として無絶縁 REBCO パンケーキコイルが注目を集めている。無絶縁巻線技術を用いた超電導マグネット応用の実現に向けて、局所的な常電導転移発生時の安定性について実験検証を進めていく必要がある。それに先行して、シミュレーションによる調査が行われているが[1-2]、これまではシングルパンケーキコイルが対象となっていた。MRI や NMR, 加速器などの実機器応用を考えた場合、複数スタックしたダブルパンケーキコイルについての調査も行う必要がある。そこで、今回は無絶縁 REBCO ダブルパンケーキコイルにおいて、局所的な常電導転移を想定し、その時の電磁的振る舞いについて PEEC モデルを用いた数値シミュレーションを行ったので報告する。

### 2. 解析モデル

Table I に解析モデルの REBCO 線材およびコイルの諸元を示す。ダブルパンケーキコイルの最内周 1 ターン分を螺旋状の渡り部分とし、2 つのコイルを回路的に接続した PEEC モデルを作成した。本研究では定常状態である無絶縁 REBCO ダブルパンケーキコイルにおいて局所的に常伝導転移が発生したと仮定して、その後の電磁的振る舞いを解析した。

### 3. 解析結果

本研究では、解析モデルであるダブルパンケーキが負荷率 80% で運転されている時、下層のパンケーキコイルの 30 ターン目の一部分 (1 要素) を常伝導転移させて、その後の PEEC モデル解析を行った。解析条件を Table II に示す。

Fig. 1 および Fig. 2 に解析対象の周方向電流分布を示す。Fig. 2 を見ると、どちらの層にも誘導電流による電流の上昇がみられるが、常電導転移が発生した下層パンケーキコイルの方が誘導電流は大きい。しかし、その値は臨界電流密度に対して十分に小さい。したがって、僅かな範囲で常伝導転移が発生した場合は、安定性を保持できることがわかった。発表当日には種々の条件で初期常電導転移が発生した場合についての解析結果を示す予定である。

TABLE I  
SPECIFICATIONS OF REBCO TAPE AND COIL

Parameter	Value
<b>REBCO tape</b>	
Tape width [mm]	4.0
Tape thickness [mm]	0.096
Copper stabilizer thickness [ $\mu\text{m}$ ]	20.0
Superconductor thickness [ $\mu\text{m}$ ]	1.0
$I_c@77\text{ K, self-field}$ [A]	115.0
<b>Coil</b>	
Coil i.d, o.d [mm]	60.0, 71.5
Number of turns (each layer)	60
Contact resistivity [ $\mu\Omega\text{cm}^2$ ]	70.0
$I_c@77\text{ K, self-field}$ [A]	47.0

TABLE II  
SIMULATION CONDITION

Parameter	Value
Operating Current [A]	37.6
Azimuthal division	32
Analysis time [s]	51.0
Time step [s]	0.1

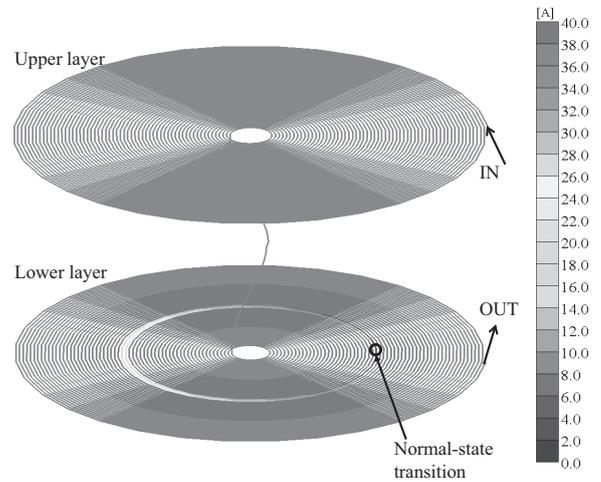


Fig. 1. The azimuthal current distribution at 0.1 s after the normal-state transition. (Not to scale)

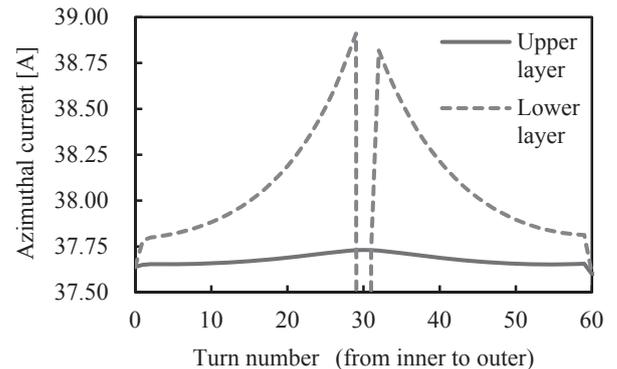


Fig. 2. The azimuthal current of each turn on pancake coils at 0.1 s after the normal-state transition.

### 参考文献

- X. Wang, et al. "Turn-to-turn contact characteristics for an equivalent circuit model of no-insulation ReBCO pancake coil," *Supercond. Sci Technol.*, vol. 26, no. 3 (2013), Art. ID. 035012.
- T.Wang, et al "Analyses of Transient Behaviors of No-Insulation REBCO Pancake Coils During Sudden Discharging and Overcurrent" *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 25, no. 3 (2015).

# 蛍光低温サーモグラフィーによる REBCO コイル内ホットスポットの可視化

## Visualization of Hotspots in a REBCO Coil Using Cryogenic Fluorescent Thermography

土屋 雄司(名大), 淡路 智, 渡辺 和雄(東北大);  
 宮崎 寛史, 花井 哲, 井岡 茂(東芝); 大保 雅哉, 飯島 康裕(フジクラ)  
 TSUCHIYA Yuji (Nagoya Univ.); AWAJI Satoshi, WATANABE Kazuo (Tohoku Univ.);  
 MIYAZAKI Hiroshi, IOKA Shigeru (Toshiba); DAIBO Masanori, IJIMA Yasuhiro (Fujikura)  
 E-mail: tsuchiya@nuee.nagoya-u.ac.jp

### 1. はじめに

高温超伝導  $REBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  (REBCO, RE:Y または希土類) 線材は、機械特性や強磁場下臨界電流  $I_c$  特性が優れることから、強磁場超伝導マグネットへの応用が期待されている[1]。一方、REBCO 線材は低温超伝導 (LTS) 線材に比べ常伝導伝播速度が遅いため、常伝導領域が発生した際にコイル全体がクエンチせず、局所的熱暴走 (ホットスポット) による劣化・焼損が懸念される。REBCO コイルにおける常伝導領域は、線材内部の  $I_c$  分布、コイル巻線、運用時の特性劣化、磁場分布などにより  $I_c$  が低い領域で発生する。特に、コイル巻線後に線材が劣化すると、分割電圧タップを設けていない場合はコイルを分解して破壊検査する必要がある。そのため、線材劣化の原因解明に向けた非破壊劣化箇所特定技術の開発が急務である。そこで本研究では、局所劣化箇所のある REBCO コイルにコイル  $I_c$  を超える電流を通電して低温蛍光サーモグラフィーによってホットスポットを可視化した。

### 2. 実験方法

Table 1 に示す諸元を持つエポキシ含浸 REBCO シングルパンケーキコイルを作製した。線材は、100  $\mu\text{m}$  厚の安定化銅層をはんだにより張り合わせたフジクラ社製 GdBCO 線材を用いた。Fig. 1(a) に示すように、アルミ板を通して伝導冷却し、20 K、5 T でコイル  $I_c$  以上まで複数回通電を行い、特性劣化を確認した。コイル  $I_c$  が劣化した REBCO コイルに対して、複数の電圧端子をはんだ付けにより設置し、低温蛍光サーモグラフィーを用いてコイル内の局所的劣化箇所を可視化した。蛍光材料には 50w%Eu-TFC 添加 PMMA を用い、励起光源として 365 nm 紫外 LED 光源を用いた。赤外蛍光を 560 nm ロングパスフィルター付き対物レンズを通して 16bit sCMOS カメラによってイメージングした。77 K、ゼロ磁場で、分割電圧とサーモグラフィーを同時に行い、劣化後のコイル  $I_c$  にてホールドした後、 $1.9I_c$  で再びホールドした。

Table 1 Specification of a single pancake REBCO coil.

Inner diameter (mm)	96
Outer diameter (mm)	156
Height (mm)	4.1
Number of total turns	101

### 3. 実験結果及び考察

特性劣化後の REBCO コイルについて、Fig. 1(a) に示すように、劣化していると考えられる箇所では、エポキシが溶け出した。よって、過電流通電時のホットスポットでは少なくとも 200  $^{\circ}\text{C}$  以上まで温度上昇したと考えられる。Fig. 2 に、劣化後、77 K、ゼロ磁場下での通電試験の結果を示す。コイル  $I_c$  でホールドした際、熱暴走は起こらなかった。励磁過程においては、コイル電圧と分割電圧には誘導電圧の差があった。一方、 $1.9I_c$  で再びホールドした時、熱暴走が起こり、コイル電圧は 4-10 ターンの分割電圧にほぼ一致した。よって、劣化は 4-10 ターンに起こっていることが確認され、Fig. 1(b) で光学観察された箇所と一致した。Fig. 3 にサーモグラフィーによって得られた電源遮断直前 (170 s) の REBCO コイルにおける温度分布像を示す。0.5 K 程度の温度上昇が確認され、光学観察した劣化箇所と一致した。以上から、非破壊での劣化箇所特定に成功したと考えられる。本講演では、コイル内の発熱分布、異方的熱伝導率について報告する予定である。

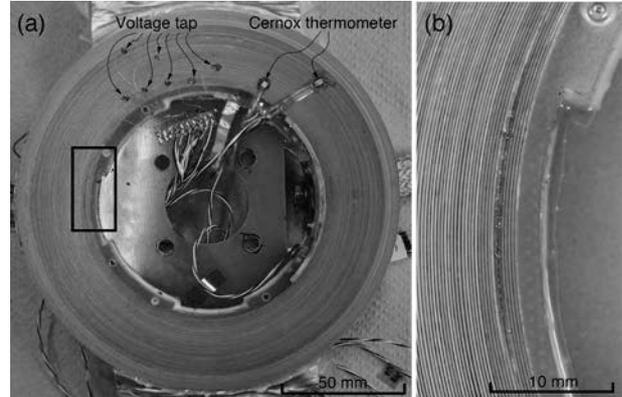


Fig. 1 Picture of (a) whole shape and (b) degradation area of a single pancake REBCO coil. A black solid line in Fig.1(a) shows the outer frame of Fig.1(b).

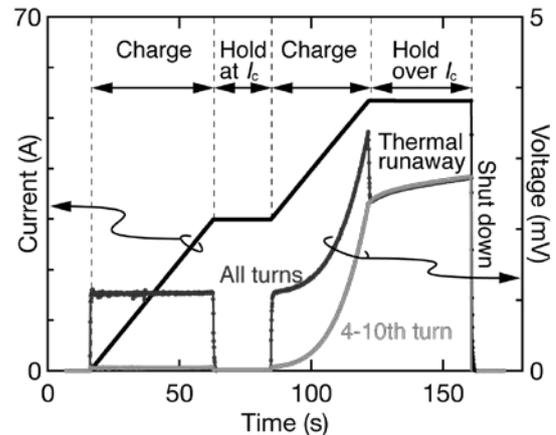


Fig. 2 Time development of current and voltage in the REBCO coil with an overcurrent.

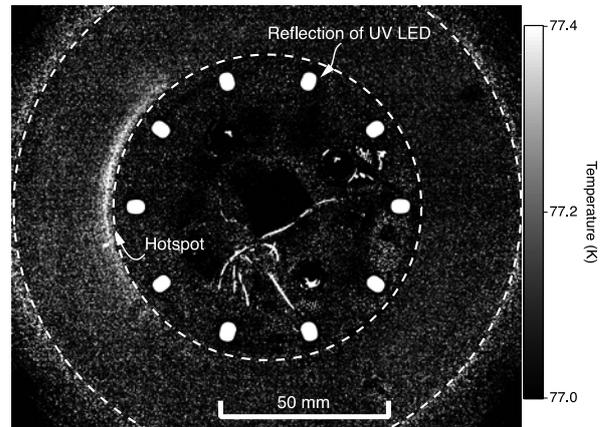


Fig. 3 Thermography of the REBCO coil with a hotspot during the hold mode.

謝辞 本研究は科学研究費補助金 (25246032, 15H03586, 16K20898, 50736080) の支援を受けて行われました。

参考文献 1. S. Awaji *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **24**, 4302005 (2014).

# 13 T-700 mm大口径マグネットのクエンチ解析

## Quench analysis of a 13 T superconducting magnets with a 700 mm bore.

今川 信作, 力石 浩孝, 尾花 哲浩, 高田 卓, 柳 長門 (NIFS)

IMAGAWA Shinsaku, CHIKARAISHI Hirota, OBANA Tetsuhiro, TAKADA Suguru, YANAGI Nagato (NIFS)  
E-mail: imagawa@LHD.nifs.ac.jp

### 1. はじめに

最高磁場 13 T, 内径 700 mm の大口径マグネット[1]用のクエンチ保護システムが完成した。図1に示すように、このマグネットは長手方向に2分割で、各々は内側から3つの Nb<sub>3</sub>Sn コイルと3つの NbTi コイルで構成されており、1つの電源で励磁される。大口径・高磁場と軽量を両立させるためには内側の Nb<sub>3</sub>Sn コイルの電流密度を高めることが有効であることから、Nb<sub>3</sub>Sn 導体の銅比を 0.8-0.9 と小さくして、遮断時には銅比 2.2 の NbTi コイルに電流を転流させることによって Nb<sub>3</sub>Sn コイルの温度上昇を抑制する設計を採用した。このクエンチ保護システムの詳細とクエンチ解析結果について報告する。

### 2. クエンチ保護回路の設計条件

大口径マグネットは、軽量化のため浸漬冷却の密巻コイルとし、径方向に6分割して 10-12 層おきに円筒容器で電磁力を支える構造とした。蓄積磁気エネルギーが 34.5 MJ と大きいので、クエンチ保護は外部抵抗方式を選択した。製造実績の範囲内で大断面の Nb<sub>3</sub>Sn 矩形導体 (3.2 mm × 2.1 mm, ガラス編組絶縁) と NbTi 矩形導体 (4.0 mm × 2.0 mm, ホルマール絶縁) を選定し、Nb<sub>3</sub>Sn コイルの層間電圧と対地電圧の設計条件は、絶縁施工の制約から各々 147 V と 1,500 V 以下とした。

クエンチ保護回路を図2に示す。15 T に増強する際の拡張性も考慮して、汎用の 1 kV-800 A 直流遮断器を採用した。保護抵抗を 1.2 Ω 以下に分割して各々に並列に直流遮断器を配置し、また、Nb<sub>3</sub>Sn コイルと NbTi コイルの切り離し遮断器 B と接地の間の抵抗を 0.6 Ω 以下にすることにより、遮断器の最大電圧は 1 kV 以下となる。通常時は 11 台全ての遮断器が閉となっており、クエンチ保護時には全ての遮断器を開とする。

### 3. クエンチ解析結果

最高磁場 13 T からの遮断の場合の温度上昇をホットスポットモデルで計算した結果を図3a, b に波線で示す。検出時間を考慮して常伝導発生から遮断開始までの遅れ時間は 0.4 s とした。電流減衰は保護抵抗のみを考慮した計算であり、この場合の到達温度は、どちらのコイルも 230 K 程度となる。隣接導体さらに隣接コイルへの常伝導伝播によるコイル抵抗値および径方向伝熱を考慮する差分解析の計算結果を図3a, b に実線で示す。Nb<sub>3</sub>Sn コイル最内層の SC12 あるいは NbTi コイル最内層の SC21 で常伝導が発生する場合の到達温度は、各々 134 K と 115 K に収まる結果が得られた。この計算では、導体長手方向と列方向の伝播速度には解析式を用い、層(径)方向の伝播は差分解析で求めた。コイル間の隙間は 0.7-1.7 mm と狭いため、沸騰が始まるとガスヘリウムが充満すると考えられ、その際の熱伝達率には 100 W/m<sup>2</sup>/K (垂直平板の自然対流熱伝達の代表値) を用いた。巻線部は厚さ 1-2 mm の対地絶縁や厚い SUS 円筒容器に囲われているため、ヘリウム冷却の効果は大きくないが、コイルの抵抗によって電流減衰が加速される効果は到達温度に大きな影響がある。

SC12 クエンチ時に切り離し遮断器 B が開かない場合の温度上昇の解析結果を図4に示す。この場合、Nb<sub>3</sub>Sn コイル自身の抵抗値が保護抵抗よりも大きな値となり、電流減衰が加速されて、到達温度は 340 K に止まる結果が得られている。

### 参考文献

1. S. Imagawa et al.: Plasma and Fusion Research, Vol. 10 (2015) 3405012

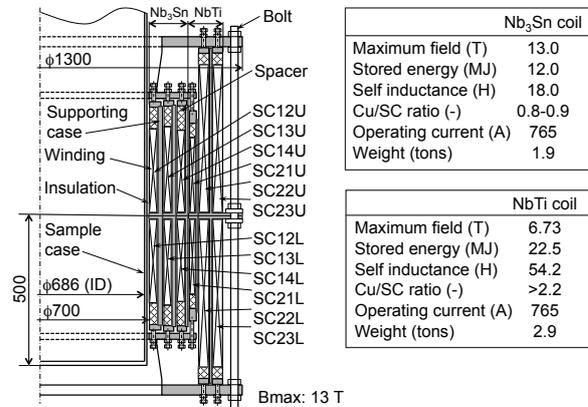


Fig. 1. Cross-section of the external field coils.

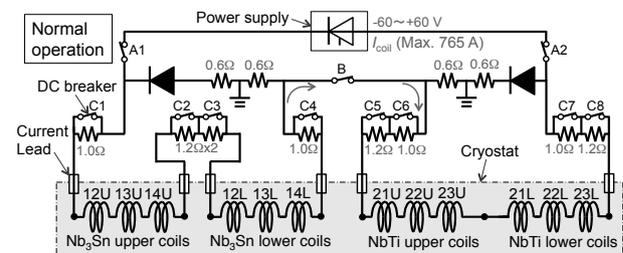


Fig. 2. Quench protection circuit for the 13 T-700 mm setup.

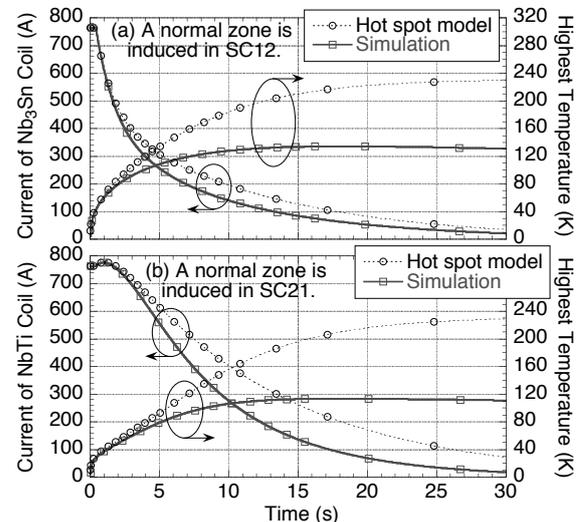


Fig. 3. Calculated currents and temperatures during shut off after quench in SC12 (a) and SC21 (b).

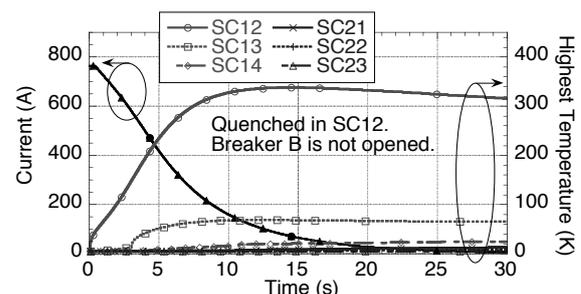


Fig. 4. Quench analysis when breaker B is not opened.