

# 回転ガンジー用高温超電導可変磁場マグネットの開発(1) —プロジェクトの概要—

## Overview of HTS magnet development for rotating gantry

田崎 賢司, 小柳 圭, 高山 茂貴, 石井 祐介, 来栖 努(東芝); 雨宮 尚之(京大・工); 荻津 透(KEK); 野田 耕司(放医研)  
TASAKI Kenji, KOYANAGI Kei, TAKAYAMA Shigeki, ISHII Yusuke, KURUSU Tsutomu (Toshiba);  
AMEMIYA Naoyuki, (Kyoto Univ.); OGITSU Toru (KEK); NODA Koji (NIRS)  
E-mail: kenji2.tasaki@toshiba.co.jp

### 1. はじめに

重粒子線によるがん治療は優れた治療効果を有する一方で、施設全体が大型であることが課題となっている。特に、任意の方向から重粒子線の照射を可能にする回転ガンジーは医療関係者のニーズが高いものの、筆者らの試算では重粒子線がん治療装置では装置重量が約 600 トンにもなり普及に至っていない。重粒子線回転ガンジーに高温超電導線材を用いて高磁場化を図ることができれば、陽子線回転ガンジー総重量と同程度(総重量 200 トン以下)の小型軽量化を実現することができる。現在進めている METI 国プロ「高温超電導コイル基盤技術開発プロジェクト」では、2013 年度から 5 ヵ年計画で高温超電導線材を用いた重粒子線回転ガンジー用偏向マグネットの設計検討を行うとともに、実機大の偏向マグネットの試作および評価を行う計画である。本発表では、このプロジェクトの開発概要について報告する。

### 2. 本プロジェクトの目標

重粒子線回転ガンジーの総重量 200 トン以下の実現に向け、要求される偏向マグネットの仕様を明らかにするために、回転ガンジーの概念検討を行った。Fig.1 に回転ガンジーの外観図、Fig.2 に検討した回転ガンジーのレイアウトの一例を示す。偏向マグネットの高磁場化でビーム偏向半径が低減することで、回転ガンジーの回転半径が小さくなり、回転ガンジー構造体の小型化を実現できる。概算ではあるが本構成で総重量 200 トン以下になることを確認した。Fig.2 に示す回転ガンジーを実現するための偏向マグネットの数値目標は以下のとおりである。

- ① 超電導コイル全長: 1.1 m (鞍型コイル形状)
- ② ビーム軌道上での最大磁場: 6 T 以上
- ③ ビーム有効領域での磁場均一度: 0.1 % 以内
- ④ 磁場変動率: 0.36 T/s 以上

### 3. 本プロジェクトの実施項目

前記目標実現に向け、本プロジェクトでは以下の 5 項目の技術開発を行う。

A. 「可変磁場コイルにおける誤差磁場予測・低減技術」  
コイル発生磁場を変化させる場合においても磁場精度 0.1% を達成できるような、実験に裏打ちされた数値電磁界解析による誤差磁場予測、コイル形状などの最適化による誤差磁場低減技術開発を行う。

B. 「可変磁場コイルの設計技術」  
RE 系線材の機械的特性、コイル巻線性および可変磁場下での誤差磁場を考慮した三次元形状コイルの設計技術開発を行う。

C. 「大型・高磁場三次元形状コイルの高精度製作技術」  
長さ 1.1 m というこれまでにない大型の三次元形状コイルを製品の製作に適用可能な合理的な工程でかつ高い信頼性を確保して製作する技術を開発する。また、発生磁場 6

T 以上で磁場均一度 0.1% 以下を実現するために、RE 系線材を複雑な鞍型コイル形状に位置精度 0.1 mm 以下で製作する巻線技術を開発する。

#### D. 「交流損失予測技術」

実験に裏打ちされた数値電磁界解析による交流損失予測技術で、コイル内の交流損失の空間分布を得る技術開発を行う。

#### E. 「熱暴走予測技術」

RE 系線材の  $I_c$ - $B$ ,  $T$ ,  $\theta$  特性(臨界電流の磁場、温度、磁場角度依存性)を考慮した熱解析をもとにして、偏向マグネットの熱暴走を回避する条件を明らかにするための技術開発を行う。

前記 A~E の技術開発を完了させた上で、小型重粒子線回転ガンジーを構成する偏向マグネット 1 台を試作し、前述の本プロジェクト数値目標①~④の実証を行う。

### 4. まとめ

重粒子線回転ガンジーの総重量 200 トン以下を実現するために必要となる偏向マグネットの数値目標を設定し、その目標実現に向け実施する技術開発項目を明確にした。2017 年度までに RE 系高温超電導線材を用いた偏向マグネット 1 台の試作および実証試験を行う。

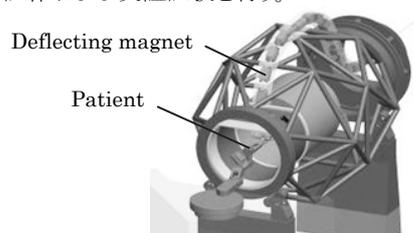


Fig.1 External view of rotating gantry

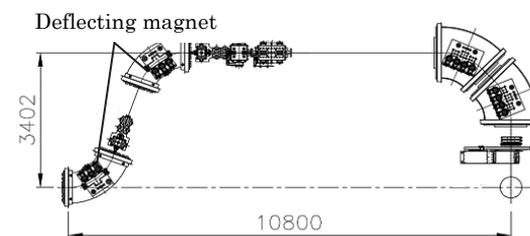


Fig.2 A layout of deflecting magnets for rotating gantry

### 謝辞

本研究は、経済産業省の産業技術研究開発委託費「高温超電導コイル基盤技術開発プロジェクト<粒子線ビーム経路部・照射部用コイル>」を通じて実施された。

# 回転ガンジー用高温超電導可変磁場マグネットの開発(2) —ビーム光学・マグネット設計—

## Beam optics and magnet design for rotating gantry

高山 茂貴, 小柳 圭, 山口 晶子, 田崎 賢司, 石井 祐介, 来栖 努(東芝);  
雨宮 尚之(京大・工); 荻津 透(KEK); 野田 耕司(NIRS);

TAKAYAMA Shigeki, KOYANAGI Kei, YAMAGUCHI Akiko, TASAKI Kenji, ISHII Yusuke, KURUSU Tsutomu (Toshiba);  
AMEMIYA Naoyuki (Kyoto Univ.); OGITSU Toru (KEK); NODA Koji (NIRS)

E-mail: shigeki2.takayama@toshiba.co.jp

### 1. はじめに

回転ガンジーとは患者の周囲 360 度あらゆる方向から粒子線を照射することを可能にする照射装置であって、陽子線を用いたがん治療装置では一般的に使用されている。一方で重粒子線がん治療装置においては装置全体が大型となってしまうと共に、重量が我々の試算で約600tと非常に重くなってしまうために普及が進んでいない。そこで本装置へ高温超電導を適用することで陽子線相当まで小型軽量化することを、METI 国プロ「高温超電導コイル基盤技術開発プロジェクト」において検討している。本発表ではビーム光学設計によって求めた回転ガンジーのマグネット構成およびその構成をもとに検討したマグネット設計について報告する。

### 2. ビーム光学設計

回転ガンジーは複数台の電磁石によって構成され、その構成および出力はビームの軌道およびサイズを考慮して決定される。ここではガンジーに適用する電磁石の出力を 6T 程度と現行機(NbTi回転ガンジー)の2倍程度高磁場化することを想定し電磁石構成について検討した。また、ここでは以下の 5 項目についても考慮した。①ステアリングマグネット(x,y)を二組配置する。②スキャンングマグネット(x,y)を一組配置する。③照射位置から最後段マグネットまでに挿入されるレンジシフタ等の機器は現行機と同等とする。④スキャンングマグネットの蹴り角は現行機と同等とし、必要な照射野を確保するために照射位置からスキャンングマグネットまでの距離を現行機と揃える。⑤電磁石は二極、四極のコンバインドとする。

設計に際し、そのビーム軌道の計算には軌道計算ソフト WINAGILE を使用した。回転ガンジーに入力されるビームの特性は現行機と同程度の  $\beta_x = \beta_y = 12\text{m}$ 、 $\alpha_x = \alpha_y = D_x = D_y = D'_x = D'_y = 0$ 、 $\epsilon_x = \epsilon_y = 10\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$  とすると共に、照射位置でのビーム特性も現行機と同等の  $\beta_x = \beta_y = 5\text{m}$ 、 $\alpha_x = \alpha_y = D_x = D_y = D'_x = D'_y = 0$  とした。上記計算条件にて四極磁場をパラメータに収束計算を実施し、その結果、得られた電磁石構成を Fig.1 に、また電磁石緒元を Table.1 に示す。

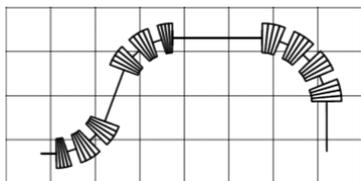


Fig.1 Layout of the superconducting rotating gantry.

Table.1 Specifications of superconducting magnets

Magnet type	A	B	C	D
Bending radius [m]	1.15	1.15	1.5	1.5
Bending angle [deg.]	18	26	22.5	22.5
Magnetic flux density (Dipole field) [T]	5.8	5.8	4.5	4.5
Maximum field gradient (quadrupole field) [T/m]	15.5	33	-	1.7

### 3. マグネット設計

ビーム光学設計によって得られた電磁石緒元をもとに 4 種類の電磁石の中の一つ(Magnet type:A)についてコイル設計を実施した。初めに起磁力および鉄心サイズの検討を、電磁界解析ソフト"POISSON"を用いて行い、四極コイルは起磁力 21kA、二極コイルは起磁力 823kA で仕様と同程度である 15.5T/m および 5.95T 発生可能であることを明らかにした。また、鉄心のサイズについても検討を行い、その結果、肉厚 400mm とすることで鉄心に飽和がないことを明らかにした。

さらに、今回は約 50 ターンの鞍型コイルを一層あたり 8 コイル配し、その位置関係で均一な磁場を与える線材配置を計算によって求めた。テープ形状の Y 系高温超電導線材においては、変形による超電導特性の変化に異方性があり、線材幅方向の歪み(エッジワイズ歪み)に対し許容最大歪みが 0.66 % と非常に小さく弱い[1]。そのため、線材にエッジワイズ歪みが増加しない形状とする必要があり、ここではコイルエンドで線材幅方向上端と下端の長さを等しくなる(等周条件)形状を計算によって求め適用した。上記で求めた三次元コイル形状をもとに、電磁界解析ソフト"Opera-3d"を用いて非線形三次元磁場解析を実施した。計算結果を Fig.2 に示す。解析の結果、中心断面ミッドプレーンでの相対磁場精度分布が有効磁場領域±20 mm の範囲内で、最大 0.0275%と目標である 0.1%以下を達成していることを確認した。

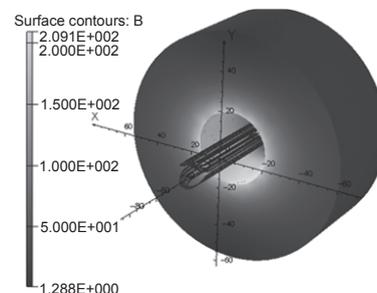


Fig.2 Result of the magnetic field calculation.

### 4. まとめ

重粒子線がん治療装置用回転ガンジーへの高温超電導の適用を想定し、ビーム光学設計およびマグネット設計を実施した。その結果、ガンジーに適用される電磁石の構成を明らかにするとともに、中心断面で均一な磁場を与えるコイル形状を明らかにした。

### 謝辞

本研究は、経済産業省の産業技術研究開発委託費「高温超電導コイル基盤技術開発プロジェクト<粒子線ビーム経路部・照射部用コイル>」を通じて実施された。

### 参考文献

1. D C van Laan, et al.: Supercond. Sci. Technol., Vol. 21 (2008) 115002

本論文に掲載の商品の名称は、それぞれ各社が商標として使用している場合があります。

## 回転ガントリー用高温超電導可変磁場マグネットの開発(3)

### —高温超電導線材を使った鞍型カーブドコイルの開発—

#### Development of curved saddle-coils for rotating gantry using coated conductors

小柳 圭, 高山 茂貴, 田崎 賢司, 石井 祐介, 来栖 努(東芝); 雨宮 尚之(京大・工); 荻津 透(KEK); 野田 耕司(NIRS)  
 KOYANAGI Kei, TAKAYAMA Shigeki, TASAKI Kenji, ISHII Yusuke, KURUSU Tsutomu (Toshiba);  
 AMEMIYA Naoyuki, (Kyoto Univ.); OGITSU Toru (KEK); NODA Koji (NIRS)  
 E-mail: kei.koyanagi@toshiba.co.jp

#### 1. はじめに

重粒子線がん治療装置の回転ガントリーを構成する偏向マグネットに高温超電導を適用することで、高磁場化、小型軽量化が期待できる。一方、ビームを患部へと正確に照射するためには、ビーム軌道に沿って湾曲した二極磁場空間を形成する「鞍型カーブドコイル」が必要になるが、テープ形状のRE系(REBCO)高温超電導線材は丸線と違って変形に制約があるため、これまでの低温超電導(NbTi)の丸線を使ったコイル設計と巻線技術とをそのまま適用することができない。本発表では、RE系線材による鞍型カーブドコイル設計の検証および特性劣化の無いコイルの試作検証を目的とし、連報のビーム光学・マグネット設計で得られた実機コイル設計に基づいてその特徴的な形状を模擬したRE系の小コイルを設計・試作した結果について報告する。

#### 2. コイル設計

テープ形状であるRE系線材を、加速器用マグネットで要求されるような複雑なコイル形状に巻くため、湾曲した面の上に巻く線材の軌跡をテープの曲率と振り率とで表記するFrenet-Serretの公式を用いて計算する設計手法を採用した[1]。この計算で求めた軌跡の座標をもとに、テープ線材を三次元巻線するコイル巻枠を設計した。設計した巻枠形状をFig.1に示す。回転ガントリー実機のマグネット設計に基づき、690mmのビーム軌道半径に沿って湾曲したダクトの外径をφ140mm、偏向角を13度とし、湾曲部分の両端に各150mmのエンド部を設けた。

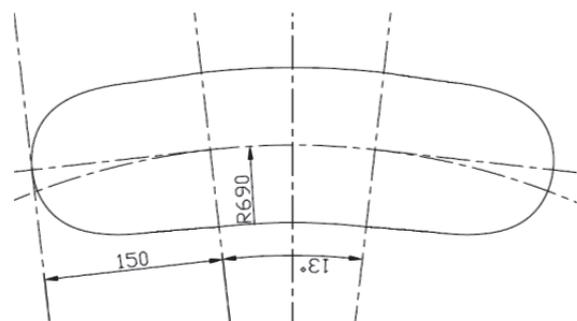


Fig.1 Schematic view of the coil bobbin.

#### 3. コイル試作

上記の設計手法を使って計算した巻枠形状を三次元ポリゴンデータに変換し、3Dプリンタに入力して巻枠を造形した。巻線方法についてはコイル設計と並行して必要な機構を検討し巻線機を開発する予定であるが、今回は巻枠を簡易的な治具に固定して手巻きで試作した。試作したコイルの外観をFig.2に示す。巻線には幅4mm厚さ0.1mmのIBAD/MOCVD線材( $I_c=99A$ ,  $n$ 値28)約10mを使用し、10ターンのコイルとした。この小コイルの超電導特性を評価するため、液体窒素

中で通電試験を実施した。通電試験によって得られたコイル電圧-電流( $V-I$ )特性をFig.3に示す。試験の結果  $I_c=70.6A$ ,  $n$ 値28.4と良好な超電導特性が確認された。

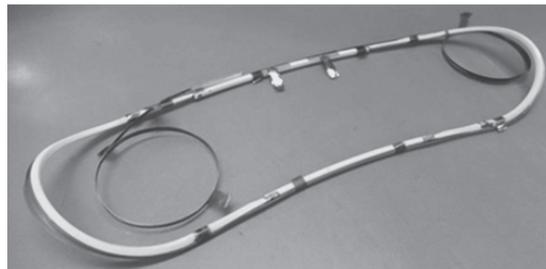


Fig.2 Outer view of a curved saddle-shaped REBCO test coil.

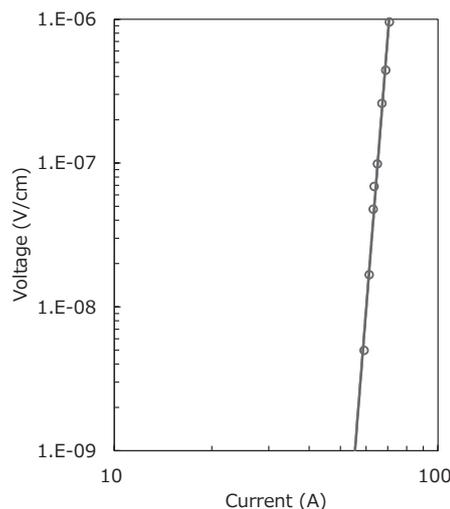


Fig.3  $V-I$  characteristics of a curved saddle-shaped REBCO test coil.

#### 4. まとめ

重粒子線がん治療装置の回転ガントリー用マグネットへのRE系線材の適用を想定し、実機の諸元を一部模擬した10m級の小コイルを手巻きによって巻線して、超電導特性に劣化の無いことを確認した。今後、偏向マグネットの試作完了を目指し、大型・高磁場三次元形状コイルの高精度製作技術開発を進めていく。

#### 謝辞

本研究は、経済産業省の産業技術研究開発委託費「高温超電導コイル基盤技術開発プロジェクト<粒子線ビーム経路部・照射部用コイル>」を通じて実施された。

#### 参考文献

1. S. Takayama, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 87 (2013) p.6

# スパイラルセクタ FFAG 加速器用高温超電導鞍型コイルの試作

## Fabrication of HTS saddle-shaped coils for spiral sector FFAG accelerators

高山 茂貴, 小柳 圭, 戸坂 泰造, 田崎 賢司, 石井 祐介, 来栖 努(東芝); 雨宮 尚之(京大); 荻津 透(KEK)  
 TAKAYAMA Shigeki, KOYANAGI Kei, TOSAKA Taizo, TASAKI Kenji, ISHII Yusuke, KURUSU Tsutomu (Toshiba);  
 AMEMIYA Naoyuki (Kyoto Univ.); OGITSU Toru (KEK)  
 E-mail: shigeki2.takayama@toshiba.co.jp

### 1. はじめに

重粒子線がん治療装置の小型・高効率・高性能化を目指し、非線形な固定磁場のみで強い収束力が得られるスパイラルセクタ FFAG(Fixed Field Alternating Gradient: 固定磁場強収束)加速器への高温超電導の適用を検討している[1]。正しく粒子を導くために所定の磁場を広い空間に高精度に発生させる必要があり、その磁場分布を達成するために、これまでに様々な複雑形状のコイル試作を行ってきた[2,3]。一方で更なる設計検討の結果、ビームダクトをレーストラック断面とすることでより効率的に磁場を発生させられることが明らかとなった[4]。本形状においても複雑な三次元形状をしたコイルが要求されるが、テープ状の Y 系線材を三次元形状に適用するには巻線時コイル形状を維持することが課題となる。線材幅方向上端と下端の長さを等しく(等周条件)したコイル形状を計算によって求めると共に、実際にコイル試作を行った結果について報告する。

### 2. コイル設計

使用した線材の諸元を Table 1 に、検討したレーストラック断面を持つ三次元コイルの諸元を Table 2 に示す。今回検討したコイルは実機の約 1/4 のサイズのミニモデルコイルであって高さ 150mm、幅 440mm、奥行 500mm とした。本コイルは大きく立体部と平面部とに分けられ、コイル全体として等周条件となるよう設計することで線材にエッジワイズ歪みが発生しない形状としている。その結果、線材に生じる歪みの最大値は 0.18%と小さく抑えられている。

Table 1 Specifications of the HTS conductor

Width	4 mm
Thickness	0.1 mm
Copper stabilizer thickness	0.04 mm
Substrate	"Hastelloy"
Type	Zr-doped wire
YBCO tape $I_c$ (77K, self-field)	83 A (End to End)

Table 2 Specifications of the HTS coil

Coil height	150 mm
Coil width	440 mm
Coil depth	500 mm
Number of turns	20
Tape length	28 m

### 3. コイル試作・特性評価試験

上記コイル設計をもとに、20 ターン(線材長 28m)のコイルを巻線した。試作したコイルの外観を Fig.1 に示す。巻枠は光造形によって製作した。直線部に設けた電極に線材の端部を固定し、一ターン目は巻枠に線材を接着しながら、二ターン目以降は前のターンに接着しながら巻線することでコイルを保持しながら巻線し、設計したコイル形状を実現した。

試作したコイルの両端に電圧タップを設け、液体窒素中にて樹脂含浸前後で通電試験を実施することでコイルの発生電圧挙動を観察した。測定したコイルの V-I 特性を Fig.2 に示す。 $10^{-9}$ V/cm の低電界領域まで n 値が 25 以上と樹脂含浸前後で

も変わらず高い特性を示したことから、三次元形状に巻いたコイルが良好な超電導特性を有していることを確認した。



Fig.1 Outer view of the HTS coil

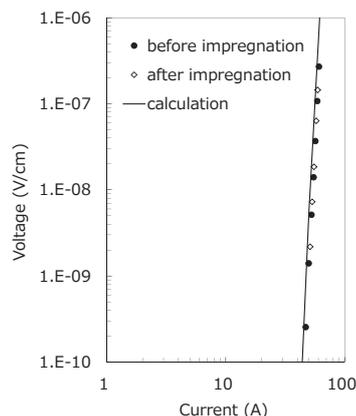


Fig.2 V-I characteristics of the HTS coil

### 4. まとめ

スパイラルセクタ FFAG 加速器マグネットに向け、歪みの少ない三次元コイル形状を設計し、実際にコイル試作を行った結果、樹脂含浸前後で超電導特性に劣化の無いことを確認した。引き続き、巻線精度の詳細な測定を進めている。

### 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(S-イノベ)」の支援によって行われた。

### 参考文献

1. N. Amemiya, et al.: Phys. C, Supercond. Vol. 482 (2012) p.74
  2. K. Koyanagi, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol.22 Issue 3 (2012) p.4101904
  3. K. Koyanagi, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol.23 Issue 3 (2012) p.4100404
  4. K. Goda, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol.24 Issue 3 (2014) p.4402605
- 本論文に掲載の商品の名称は、それぞれ各社が商標として使用している場合があります。

# FFAG 加速器用高温超伝導マグネットの異常モードと発熱に関する検討

An analytical study of beam loss-induced instability in HTS coils for FFAG accelerator magnet

小柳 圭, 高山 茂貴, 田崎 賢司, 石井 祐介, 来栖 努(東芝); 雨宮 尚之(京大・工); 荻津 透(KEK)  
 KOYANAGI Kei, TAKAYAMA Shigeki, TASAKI Kenji, ISHII Yusuke, KURUSU Tsutomu (Toshiba);  
 AMEMIYA Naoyuki, (Kyoto Univ.); OGITSU Toru (KEK)  
 E-mail: kei.koyanagi@toshiba.co.jp

## 1. はじめに

JST 国プロS イノベのプログラム「高温超伝導を用いた高機能、高効率、小型加速器システムへの挑戦」では、スパイラルセクタ型 FFAG (Fixed Field Alternating Gradient: 固定磁場強収束) 加速器への高温超伝導の適用を検討している。加速器用超伝導マグネットに特有の異常モードとして、マグネットボア壁面へのビームの衝突(ビームロス)が挙げられる。本発表では、ビームロスが高温超伝導コイルの温度上昇に与える影響を確認することを目的として、ビームロスによるコイルへの入熱量や異常の継続する時間、コイルの初期温度等をパラメータとした局所的な発熱挙動の解析を実施した結果に関して報告する。

## 2. 異常モードのモデル化

重粒子線がん治療装置の運転中に、装置の異常など何らかのトラブルが発生して粒子が正常に加速されず軌道を外れた場合、最悪のケースとして全ビームがコイルに衝突してしまう可能性が考えられる。加速器用マグネットへの非定常な熱負荷として、430MeV/u に加速した  $10^{10}$ ppp オーダーの  $^{12}\text{C}^{6+}$  ビームの全てがある角度をつけてビームチューブに衝突する場合を仮定して超伝導コイルへの入熱量を概算し、この入熱によるコイル温度の上昇を非定常熱解析により求めた。想定した粒子数は、重粒子線がん治療の 1 回の治療ぶんに相当する。コイルのモデルとして、Fig.1 に示す形状の RE 系 (REBCO) コイルを仮定し、コイル構成材料の比率と各々の物性値をもとに比熱や熱伝導率等を算出して解析に使用した。

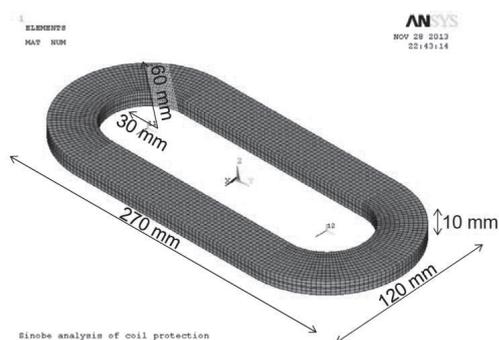


Fig.1 Thermal analysis model of the REBCO coil.

## 3. 到達温度の発熱密度依存性

超伝導コイルへの入熱量を 4.4J と概算し、発熱時間をパラメータとしてコイルの到達温度を解析した。解析の結果、発熱量と到達温度との間にはほぼ線形の関係がある結果となり、初期温度を 20K とし、 $5.24\text{mm}^3$  の発熱領域に 0.1 秒間の入熱があった場合の到達温度は最高で 29K となる結果が得られた。また、ビームロスによる非定常な熱負荷が継続する時間をパラメータとして、コイルの到達温度を解析した。入熱量を一定とし、入熱が継続する時間を 1s から 1ms まで変化させて解析した。入熱時間が 1s の場合、および 1ms の場合の解析結果を Fig.2 に示す。最も厳しい入熱時間 1ms の場合、コイルの局所が断

熱的に加熱され、初期温度 20K の場合に約 49K まで到達する結果となった。

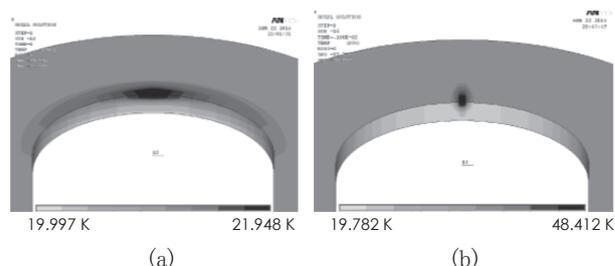


Fig.2 Temperature distributions in the REBCO coil due to a beam losses of 1s (a) and 1ms (b) duration.

## 4. 初期温度と到達温度の関係

コイルの初期温度をパラメータとしてコイルの到達温度を解析した。初期温度を 20K, 30K, 40K として解析した結果を Fig.3 に示す。初期温度が高いほど巻線部の比熱が大きくなるため温度上昇が抑えられ、初期温度 20K の場合の温度上昇が約 9K であるのに対し、初期温度 40K の場合の温度上昇は約 5.7K となった。

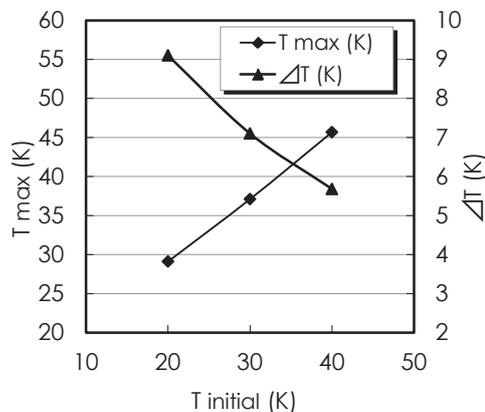


Fig.3 Temperature variations from the initial condition of the REBCO coil.

## 5. まとめ

加速器用マグネットに特有の異常モードとして想定されるビームロスについて、RE 系コイルをモデル化して入熱条件と発熱挙動を解析で確認した。今回の結果では、熱の付与の条件によっては大きな温度上昇を引き起こす可能性があることが分かった。今後、ビームのエネルギーや入射角度などの条件の精査とともに、ビームチューブによる遮蔽の効果の確認を予定している。

## 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(S-イノベ)」の支援によって行われた。

# 薄膜線材で巻かれた梯子型コイルによる スパイラルセクタ FFAg 加速器用コイル支配型マグネットの磁場設計

## Field designs of magnets for FFAg accelerator using ladder-shape coils wound with coated conductors

雨宮 尚之, 合田 和弘, 中村 武恒(京大・工); 森 義治(京大・原子炉); 荻津 透(KEK); 来栖 努(東芝);  
野田 耕司(放医研); 吉本 政弘(原子力機構)

AMEMIYA Naoyuki, Goda Kazuhiro, NAKAMURA Taketsune, MORI Yoshiharu (Kyoto University);  
OGITSU Toru (KEK); KURUSU Tsutomu (Toshiba); NODA Koji (NIRS); YOSHIMOTO Masahiro (JAEA)

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

### 1. はじめに

我々は、重粒子線がん治療装置への応用を目指して、直流磁場を用いて強いビーム集束力が得られる FFAg 加速器用の高温超伝導マグネットの設計を進めてきた。今回は、スパイラルセクタ FFAg 加速器を対象とし、薄膜高温超伝導線材で巻かれた梯子型平面部と立体部を持つコイルで構成されるマグネット、梯子型平面コイルで構成されるマグネットの磁場設計について報告する。

### 2. 設計方法

設計の流れは以下の通りである。

- 2次元断面設計: 局所  $k$  値を磁場評価の指標として所望の分布の磁場を発生するために必要なコイル断面における線材配置を設計する。なお、線材をばらばらに巻くのではなく、線材を密に巻いた線材ブロックと呼ばれる部分コイルを所望の磁場分布を発生できるように離散的に配置することによりコイル全体を構成する。
- コイル断面における線材配置を加速器周方向に引き伸ばし、さらにコイルエンドを形成するように正負の線材を接続する。その際、微分幾何を用いて線材形状と線材に加わる機械的歪の関係を表現し、線材の機械特性を考慮して巻線形状を決定する。
- 線材ブロックの CAD データを作成し、さらにコイル周囲のリターンヨークならびにフィールドクランプと呼ばれる鉄の CAD データを作成する。
- CAD データに基づいて、市販の有限要素磁場解析ソフトウェアを用いて鉄の非線形性を考慮し磁場計算を行う。
- 計算された磁場分布から積分磁場を計算し、局所  $k+1$  値を指標として磁場を評価する。局所  $k+1$  値の許容相対誤差を 0.5%とし、これを満たすまで各線材ブロックのターン数を修正し反復計算を行う。

### 3. 設計結果

Table 1 に諸元を示した加速器を構成するマグネットを設計した。設計したマグネットのコイル形状を Fig. 1 に、諸元を Table 2 に示す。コイルを囲むように設置するリターンヨーク・フィールドクランプも設計している。加速器の諸元として  $k$  値で規定される径方向分布を持った磁場を発生するために線材ブロックは梯子型に配置されている。また、同じアンペアターンに対する磁場発生効率を上げるために高磁場側を立体形状にして高磁場側赤道面上にも導体を配置している。なお、ここに示したマグネット以外に平面形状の梯子型コイルで構成されるマグネットの設計も行ったが、この場合、必要な線材長は 14 km となった。

### 4. まとめ

薄膜線材で巻かれた梯子型コイルから構成されるスパイラルセクタ FFAg 加速器用超伝導マグネットの設計を行った。加速器 1 台あたりの必要線材長は 500 A 通電を想定した場合で 110 km、250 A 通電を想定してもその約 2 倍の 220 km 程

度である。今後、磁場分布の細かい調整を行ったのち、ビームトラッキングを行うことを検討している。

### 謝辞

本研究は、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)】として、科学技術振興機構からの委託により実施したものである。

Table 1 Specifications of accelerator

Spiral sector FFAg accelerator	
Particle	$C^{+6}$
Energy	40 - 400 MeV/u
Major radius	4.65 m
Average orbit radius	3.8 - 5.5 m
Field index $k$	5.7
Integrated magnetic field	0.36 Tm @ $r = 3.8$ m 3.91 Tm @ $r = 5.5$ m
Number of cell	10
Spiral angle	58.4 deg
Packing factor	0.5

Table 2 Specifications of designed magnet

Magnet consisting of 3D ladder coil	
Inner / outer radius of coils	3.65 m / 5.6 m
Inner height of coils	0.3 m ( $\pm 0.15$ m)
Outer radius of magnet (iron yoke)	6.2 m
Height of magnet (iron yoke)	2 m
Weight of iron	56 t
Conductor current / number of turn	500 A / 1964
Number of conductor block	10
Length of conductor	11 km ( $I_t = 500$ A)
Maximum magnetic field at conductor	7.5 T
Stored energy	1.89 MJ

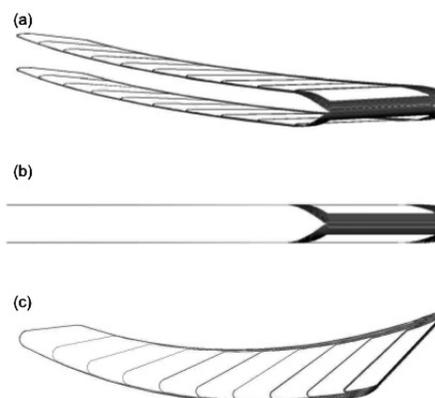


Fig. 1 Shape of designed coil: (a) bird-eye view; (b) side view; (c) top view.

# コイルエンド部巻き線時の高温超伝導線材に加わる歪の検討

## Study of a deformation of coated conductors at coil ends during winding process

宮原 秀敏, 雨宮 尚之(京大); 荻津 透(KEK); 来栖 努(東芝)

MIYAHARA Hidetoshi, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto University); OGITSU Toru (KEK); KURUSU Tsutomu (TOSHIBA)

E-mail: h-miyahara@asl.kuee.kyoto-u.ac.jp

### 1. はじめに

高温超伝導線材を加速器用マグネットに適用する場合、高精度の磁界を発生させるためには線材を正確に巻き線することが必要である。しかし、高温超伝導線材のほとんどはテープ形状を有しているため、線材幅方向(edge-wise 方向)に曲げることが困難であり、マグネット設計を行う上で大きな問題となっている。加速器用マグネットでは、粒子の出入り口を確保するために線材を 3 次元的に巻き線するコイルエンド部において、線材の曲げに関する制約が問題となる。そこで今回、3 種類の開口角の異なる鞍型形状コイルを対象とし、微分幾何を用いた線材の近似により、コイルエンド部の形状について 2 種類の状態を考えた。各状態の線材歪や線材の傾き差などからコイルエンド部の形状についての考察を報告する。

### 2. 微分幾何による鞍型形状コイルの表現方法

まず、Fig. 1 のように 3 次元的巻き線形状を微分幾何を用いて表現した。具体的には、Fig. 1 に示した Frenet-Serret の式の拡張式を用いた[1]。ここで、edge-wise 曲げ歪が 0 である形状を考えると、その形状は巻き棒上の基線に対して一意に定まる。基線を等間隔に引くと、edge-wise 曲げ歪が 0 である形状は線材面が重なってしまう。基線に対して、追加捻りを導入し、ターン間で線材面が平行になるようにして線材が重ならないようにしたモデルをモデル A とする。モデル A では追加捻りにより edge-wise 曲げ歪が生じる。モデル A に対して、基線をずらすことで線材が重ならないようにしたモデルをモデル B とする。

3 種類の鞍型形状コイル(開口角 ±70°, ±45°, ±20°、コイル巻き棒の半径 70 mm、線材数 25)を対象とし、2 種類のモデルの比較検討を行った。それぞれのコイルについて形状や線材歪、線材の傾き差は Fig. 2 のようになった。コイル形状がモデル A と仮定した場合、ターン数 25 と少ないターン数で edgewise 曲げ歪が 0.08-0.4 % となっている。よって、モデル A のように線材面は各ターンで平行にならず、モデル B のように少しずつ線材の傾きが変化していると考えられ、モデル B の方が妥当であるとした。

### 3. 2 極マグネットの磁界設計

上記の検討に基づき、2 極マグネットの磁界設計を行った。このマグネットは回転ガントリ搭載用ビーム輸送マグネットの一部を模擬したものである[2]。設計したマグネットの鳥瞰図を Fig. 3(a)、2 次元断面図を Fig. 3(b)、コイルエンド部先端の断面図を Fig. 3(c)に示す。2 極積分磁界が 2.64 Tm、高次多極積分磁界成分が 2 極成分に対して 10<sup>-4</sup> 以下になるように設計することができた。

### 参考文献

1. S. Russenschuck: "Field computation for accelerator magnets", WILEY-VCH (2010), p616-629
2. Y. Iwata, et.al: "Design of a superconducting rotating gantory for heavy-ion therapy", PHYSICAL REVIEW SPECIAL TOPICS -ACCELERATOR AND BEAMS 15,044701 (2012)

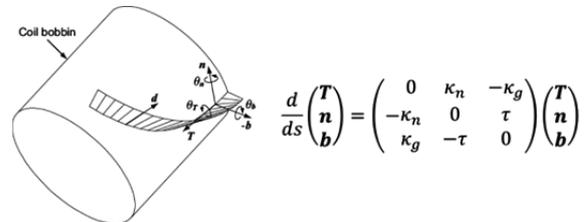


Fig. 1 Expression by differential geometry

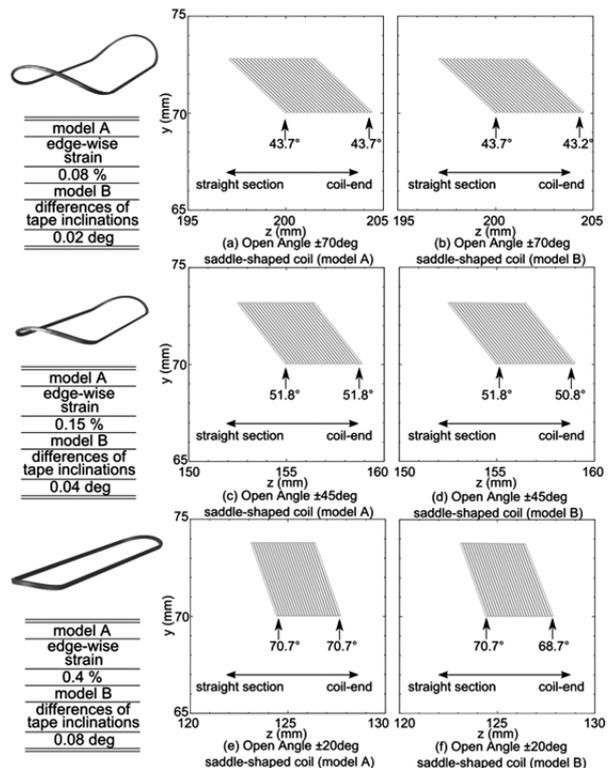


Fig. 2 Three types of saddle-shape coils

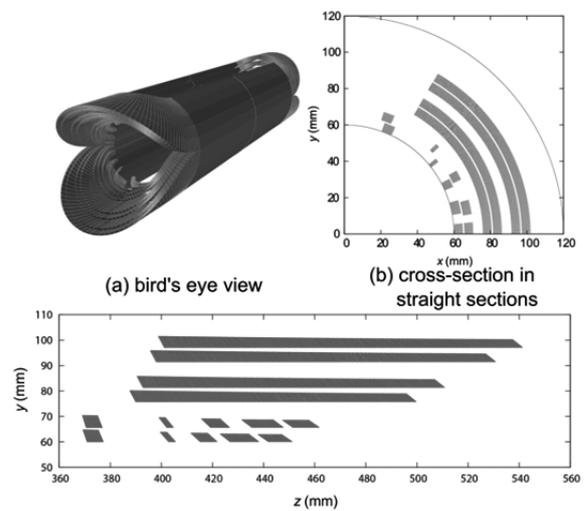


Fig. 3 Dipole magnets

# 超高磁場 LTS/REBCO NMR 磁石のコイル保護技術確立に向けて； 非絶縁 REBCO レイヤー巻きコイルにおける高速シングルターンモード伝播 による熱暴走の自動収束

## Self-healing from thermal runaway for an uninsulated layer-wound REBCO coils due to rapid single-turn mode propagation

柳澤 吉紀(理研);佐藤 耕太, 柳澤 杏子, 名和 雅斗, 中込 秀樹(千葉大);前田 秀明(理研)

YANAGISAWA Yoshinori (RIKEN); SATO Kota, YANAGISAWA Kyoko, NAWA Masato, NAKAGOME Hideki (Chiba Univ.);  
MAEDA Hideaki (RIKEN)

E-mail: y.yanagisawa@gsc.riken.jp

### 1. はじめに

REBCO コイルにおいては、熱暴走からの保護が重要な課題である。NMR のように、LTS コイルと組み合わせた磁石において LTS コイルがクエンチした場合、誘導電流により REBCO コイルが非常に高い電流密度で熱暴走が起こることが危惧される。ターン間の絶縁を使用しない非絶縁巻線法[1]は、REBCO コイルの熱暴走からの保護技術として使用できる可能性がある。我々は、非絶縁 REBCO パンケーキコイルでは、熱暴走が起きると、通常時のマルチターンモードから、シングルターンモードに速やかに転移し、電流密度が激減して熱暴走が自動収束することを昨年秋の学会で報告した[2]。

我々は超高磁場 NMR 磁石の開発を進めているが、この種の磁石では、磁場均一度の観点からレイヤー巻きコイルが必要となる。本研究では非含浸の小型レイヤー巻き非絶縁 REBCO コイルを製作し、コイル保護の観点からシングルターンモード転移現象について調べた。

### 2. 実験方法

SuperPower 社製の REBCO 線材(SCS4050, 幅 4 mm, 厚さ 0.1 mm, 77 K での臨界電流 110 A, 長さ 7.45 m)を用いて、内径 30 mm, 外径 31.6 mm, 長さ 60 mm, 総巻数 72(レイヤー数 6, 1 レイヤーあたりの巻数 12)の非絶縁 REBCO レイヤー巻きコイルを製作した。コイルは含浸しなかった。コイル臨界電流は 64 A である。コイル内の上端, 中心, 下端の 3 か所にホール素子を設置した(それぞれ  $B_{z,up}$ ,  $B_{z,cent}$ ,  $B_{z,low}$ )。コイルを液体窒素中に設置し、熱暴走が起こるまで電流を上昇させ続け、各レイヤーの電圧とコイル内部の磁場を測定した。

### 3. 実験結果

コイル臨界電流を超えて通電を行ったところ、110 A において自然熱暴走が発生し、テイクオフ電圧が発生した。次いで、コイル中心磁場が急激に減少し、電圧上昇が止まり、熱暴走が収束した。すなわち、パンケーキコイルで見られるシングルターンモード転移と同様の現象が起きた。この時のコイル内の 3 か所における磁場の時間変化を Fig.1(a)に示す。結果は熱暴走開始時の磁場の値で規格化して表記している。磁場減衰は、上端部 ( $B_{z,up}$ ) から始まり、次いで中心部 ( $B_{z,cent}$ ) において起こり、最後に下端部 ( $B_{z,low}$ ) で起こっている。これは Fig.1(b)に示すように、シングルターンモード転移が、コイル上端部から始まり、コイル下端に向かって伝播していることを表している。 $B_{z,up}$  と  $B_{z,low}$  の値がそれぞれ 90%にまで減少する時間の差(0.17 s)と、ホール素子間の距離(60 mm)から、シングルターンモード転移がコイル軸方向に伝播する速度を見積ると、60 mm / 0.17 s = 370 mm/s である。別途実験を行った絶縁 REBCO コイルにおけるコイル軸方向の常伝導伝播速度が 1.48 mm/s であることを考えると、この伝播速度は非常に速い。これは(i) 臨界電流の 172%にあたる高い電流値において、巻線全体が熱暴走寸前の状態にあること、(ii) 絶縁がなく、巻線部の熱伝導性が高いため、(iii) 絶縁がなく、熱暴走時に電流が隣接するターンへと自由に流れることができるため、であると推察される。

同様の実験を多数繰り返し、コイル軸方向のシングルターンモード伝播速度をプロットしたものを Fig.2 に示す。伝播速度は 300 - 2000 mm/s の間にあり、LTS コイルの常伝導伝播速度[3]に近い。速度のばらつきは、熱暴走やコイル冷却による熱サイクルによって、ターン同士の接触状態が変動するため

であると推察される。実験の繰り返しによる電圧-電流特性の劣化は見られなかった。

### 4. 考察

LTS コイルでは、クエンチ時の常伝導伝播速度が速いため、常伝導抵抗が急激に増加し、蓄積エネルギーがジュール熱に代わり、コイル全体の温度上昇に使われる。この場合、電流減衰時間が十分短いため、コイルが自己保護される。非絶縁 REBCO レイヤー巻きコイルが過電流により熱暴走した場合、シングルターンモードがコイル全体に素早く伝播する過程で、蓄積エネルギーがコイル全体の温度上昇に使われ、LTS コイルの場合と同様にコイルが自己保護されると考えている。

### 5. まとめ

非含浸の非絶縁 REBCO レイヤー巻きコイルでは、自然熱暴走が起きた場合、コイル上端部からシングルターンモード転移が起き、これがコイル下部に向かって伝播する。これにより、速やかにコイル全体の電流密度が減少し、熱暴走が収束する。この現象は、LTS コイルにおいて、クエンチ時の常伝導伝播によって電流減衰時間が十分短くなり、自己保護されるメカニズムと類似している。

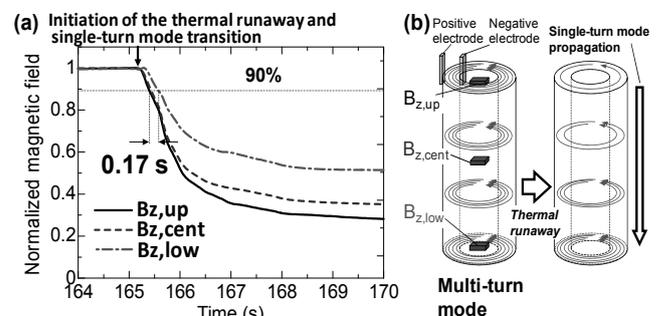


Fig.1 (a) Normalized magnetic field versus time during thermal runaway. (b) Schematic view of single-turn mode propagation.

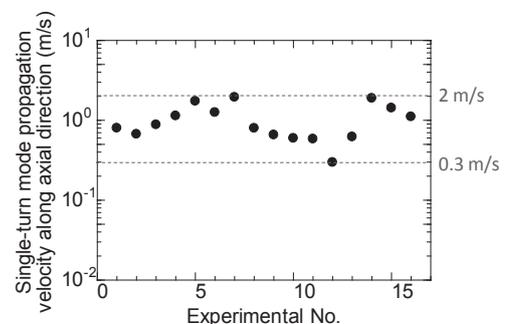


Fig.2 Single-turn mode propagation velocity along coil axial direction for numbers of experiments.

### 参考文献

- Hahn et al, *IEEE TAS*, **21** (2011) 1592–1595.
- Yanagisawa et al, *Physica C*, **499** (2014) 40–44.
- Wilson, *Superconducting Magnets*, (1982)

# レイヤー巻き方式とパンケーキ巻き方式の非絶縁 REBCO コイルにおける シングルターンモード転移

## Single-turn mode transition for a layer-wound uninsulated REBCO coil and a pancake-stacked uninsulated REBCO coil

柳澤 杏子, 名和 雅斗, 佐藤 耕太(千葉大); 柳澤 吉紀(理研); 中込 秀樹(千葉大); 前田 秀明(理研)  
 YANAGISAWA Kyoko, NAWA Masato, SATO Kota(Chiba Univ.); YANAGISAWA Yoshinori(RIKEN);  
 NAKAGOME Hideki (Chiba Univ.); MAEDA Hideaki (RIKEN)  
 E-mail: kyoko.yanagisawa@riken.jp

### 1. はじめに

前報で、レイヤー巻き非絶縁 REBCO コイルにおける、シングルターンモード転移現象について議論した。本報では、非絶縁のレイヤー巻きコイルとパンケーキ巻きコイルにおける、基本的な振る舞いの差を明らかにするために、同形状のコイルを、それぞれレイヤー巻きと、ダブルパンケーキ巻きで製作して通電試験を行い、(i) 自然熱暴走・シングルターンモード転移が起こる電流値、(ii) シングルターンモード伝播の振る舞い、(iii) 回路時定数と遮蔽電流に起因する励磁遅れについて比較した。

### 2. 実験方法

前報で用いた非絶縁レイヤー巻きコイル(Fig.1(a))とほぼ同形状の非絶縁パンケーキコイルを製作した(Fig.1(b))。SuperPower 社製の REBCO 線材(SCS4050, 幅 4 mm, 厚さ 0.1 mm, 77K での臨界電流 90 A, 線材総長 0.6 m)を使用して、内径 30 mm, 外径 31.2 mm, ターン数 12 (=6×2)の非絶縁 REBCO ダブルパンケーキコイルを 6 個積層した。ダブルパンケーキ同士を直列に接続し、パンケーキ同士を厚み 0.1 mm の FRP 製のシートで絶縁した。コイル臨界電流は 53 A である。コイル内の上端部, 中心部, 下端部の 3 か所にホール素子を設置した(それぞれ  $B_{z,up}$ ,  $B_{z,cent}$ ,  $B_{z,low}$ )。コイルを液体窒素中に設置し、熱暴走が起こるまで電流を上昇させ続け、各パンケーキの電圧とコイル内部の磁場を測定した。

### 3. 結果と考察

レイヤー巻きコイルでは 110 A (臨界電流の 172%) で熱暴走・シングルターンモード転移が起こったのに対し、パンケーキコイルは 74 A (臨界電流の 140%) でこれらが起きた。また、レイヤー巻きコイルでは、熱暴走の前に、磁場-電流の線形関係が崩れているのに対し(Fig.2(a)参照)、パンケーキコイルでは熱暴走直前まで線形関係がある(Fig.2(b)参照)。これらの差は以下のように説明できる。レイヤー巻きコイルにおいては、まず臨界電流の低いコイル上下端部において常伝導転移が起き、まだ超伝導状態にあるコイル中心部へと一部の電流が退避する。これにより、コイル全体が常伝導状態になるまで熱暴走が起きないため、コイル臨界電流よりはるかに高い電流値で熱暴走が起きる。一方、パンケーキコイルでは、パンケーキごとに熱的・電氣的に絶縁されているため、コイル臨界電流を超えると、常伝導転移したパンケーキが先行して熱暴走を起こすのである。

Fig.2(a)に示すように、レイヤー巻きコイルでは、熱暴走時のコイル内の磁場の落ち方が連続的であり、2 秒以内に磁場減衰が済んでいる。これは前報で述べたように、熱暴走によりコイル全体が速やかにシングルターンモードに転移していることを表す。一方、パンケーキコイルでは、Fig.2(b)に示すように、磁場の落ち方が不連続であり、コイル全体がシングルターンモードに転移するのに約 45 秒の時間を要している。これは、パンケーキごとに独立してシングルターンモード転移が起きるためである。この現象については別報[1]で詳述する。

非絶縁コイル特有の回路時定数による励磁遅れと、REBCO コイルに特有の遮蔽電流の緩和による磁場変動が重畳した磁場ドリフト現象についても比較を行った。学会にて報告する。

### 4. まとめ

非絶縁レイヤー巻きコイルでは、非絶縁パンケーキコイルと比べ、熱暴走・シングルターンモード転移が起こる電流が高い。また、レイヤー巻きコイルではコイル全体が速やかにシングルターンモード転移するのに対し、パンケーキコイルでは、個別にシングルターンモード転移が起きる。

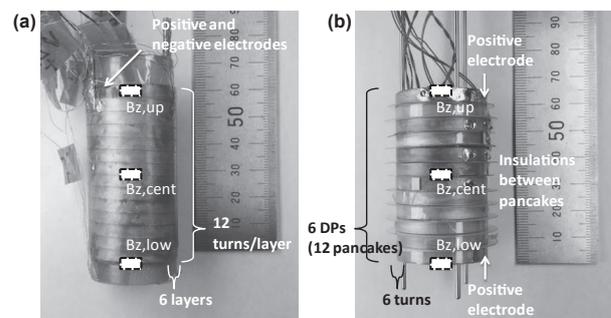


Fig.1(a) Uninsulated layer-wound coil and(b) uninsulated double pancake coil.

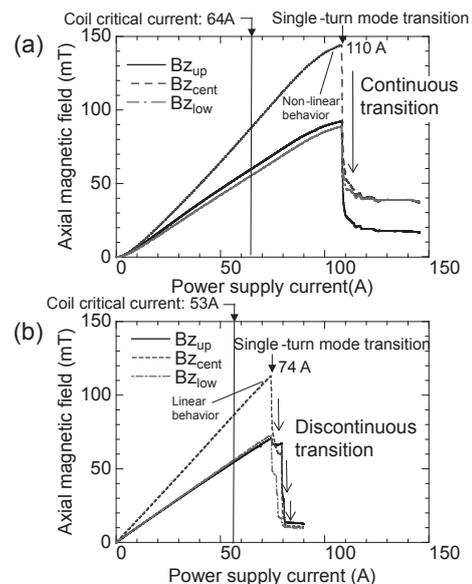


Fig.2 Magnetic field versus power supply current for (a)uninsulatedlayer-wound coil and (b) uninsulated double pancake coil.

### 参考文献

1. 名和他, 2014 年度春季低温工学・超電導学会, 1P-p17.

# 無絶縁 REBCO 線材を巻線したパンケーキコイルの 過電流通電特性に関する数値解析・評価

## Numerical Analysis of Electrical Behavior in No-insulation REBCO Coil under Over-Current Condition

王 韜, 池田 愛花, 大木 隆宏, 王 旭東, 石山 敦士(早大);野口 聡(北大);Seungyong Hahn, 岩佐 幸和(MIT)  
Wang Tao, Ikeda Aika, Ohki Takahiro, Wang Xudong, Ishiyama Atsushi (Waseda University);  
Noguchi Sou (Hokkaido University); Seungyong Hahn, Iwasa Yukikazu (MIT)  
E-mail: michealwang@fuji.waseda.jp, atsushi@waseda.jp

### 1. はじめに

我々は、REBCO 線材に電気絶縁を施さない無絶縁コイル巻線方式(No-insulation コイル, 以下「NI コイル」と略記)を高温超電導コイルに採用するための検討を行っている。NI コイル構造を用いることで、本来二律背反の関係にある高電流密度化と高熱的安定化の両者を同時に満足するコイル設計の可能性が期待されている [1][2]。一方、NI コイルの電磁的・熱的挙動の詳細はまだ明らかにされていない。そこで今回は、先行実験で観測された NI コイルの過電流通電時に於ける特有の振舞いに着目し、層間接触電気抵抗、超電導線材の  $I$ - $V$  特性、巻線の自己・相互インダクタンスを考慮した PEEC (Partial Element Equivalent Circuit) に基づく巻線内の電流分布解析と、差分法に基づく温度分布解析を連成し、NI コイル過電流通電時の過渡的な電磁的・熱的振舞いを解析・評価したので報告する。

### 2. 実験結果

今回対象とする過電流通電特性試験に用いられた REBCO シングルパンケーキコイルの諸元を Table 1 にまとめる。液体窒素浸漬冷却下で行われた実験結果を Fig.1 に示す。励磁電流は  $0.5 \text{ A/s}$  で  $125 \text{ A}$  まで増加させた。途中、コイルの中心磁場は図中の A 点付近で鈍り始め、同時にコイルの両端電圧が上昇し始めた。その後、励磁電流が  $87.5 \text{ A}$  付近(B点)で、コイルの中心磁場は急激に落ち始め、逆にコイルの両端電圧が急上昇した(C点)。そして、電流が  $125 \text{ A}$  一定になって以降は、コイルの中心磁場およびコイル両端電圧はほぼ一定の値のまま推移した(D点)[2]。

### 3. 解析条件

今回は次の2種類の解析を行った。

<解析①> 温度分布解析を行わず、PEEC 解析(周方向に18分割)のみを行った。このとき REBCO 線材の  $I$ - $V$  特性として、コイル  $I_c=54 \text{ A}$ ,  $n$  値= $10,20,30$  一定とした。層間の接触電気抵抗  $R_{ct}$  は、先行研究[1]で得られた値( $70\mu\Omega\cdot\text{cm}^2$ )を用いた。

<解析②> ①の PEEC 解析に、温度分布解析を連成した。今回はまず手始めとして次のような解析条件を設定した。

- ・熱的境界条件はすべて断熱条件とした。
- ・超電導線材の  $I$ - $V$  特性(磁場・温度依存性を含む)は過去の他の REBCO 線材の実測データを用いた。
- ・層間の接触電気抵抗  $R_{ct}$  は、①と同じく先行研究[1]で得られた値( $70\mu\Omega\cdot\text{cm}^2$ )を用いた。
- ・層間方向の熱伝導率を、線材長手方向(コイル周方向)の  $1/20$  と仮定した。

### 4. 解析結果

解析結果を Fig.3 に示す。Fig.1 の結果にあわせて、解析によって得られたコイル内の周方向電流によって発生する中心磁場の変化をプロットした。これらの結果を用いて、過電流通電状態に入ったのちのコイル内の電流再配分、発熱(超電導線材の発熱と層間接触電気抵抗による発熱)・温度分布の時間変化の様子を考察した。その詳細は当日報告する。

Table 1 Specifications of REBCO Single Pancake Coil

Parameters	Values
HTS Conductor	Super Power SCS4050
Conductor width; thickness [mm]	4.0; 0.1
Copper stabilizer thickness [mm]	0.04
$I_c$ @ 77K, coil [A]	54
Number of turns	30
i.d.; o.d.; height [mm]	60; 66; 4.0
Inductance [ $\mu\text{m}$ ]	110

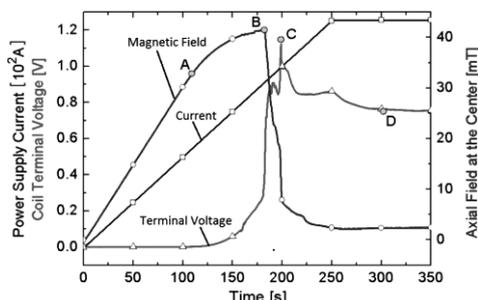


Fig. 1 Overcurrent test results of the REBCO single pancake coil up to 125 A.

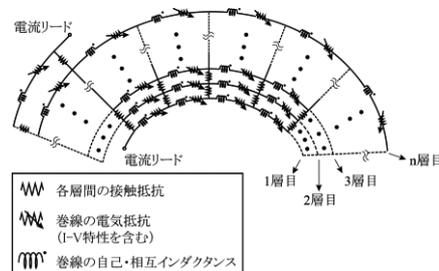


Fig. 2 Partial Element Equivalent Circuit (PEEC) of REBCO single pancake coil

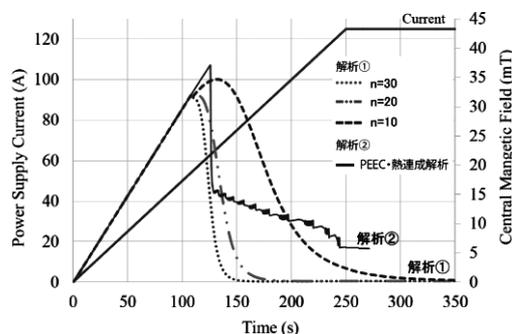


Fig. 3 Analysis results on overcurrent test of REBCO single pancake coil

### 参考文献

1. 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 (2013) 035012
2. S.Hahn, Y.Iwasa et al., "HTS Pancake Coils Without Turn-to-Turn Insulation", IEEE Trans. On Appl. Supercond., Vol. 21 (2011) 1592-1595