

# 異なる固定子巻数とギャップ長を有する高温超伝導誘導同期モータの特性評価 Characteristic Evaluation of HTS Induction/Synchronous Motor with Different Turn Number of Stator Windings and Geometrical Gap-length

中村 武恒 (京大); 伊藤 佳孝, 吉川 雅章, 寺澤 俊久 (イムラ材研); 大橋 義正 (アイシン精機)  
NAKAMURA Taketsune (Kyoto Univ.); ITOH Yoshitaka, YOSHIKAWA Masaaki, TERAZAWA Toshihisa (IMRA MATERIAL);  
OHASHI Yoshimasa (AISIN SEIKI)  
E-mail: tk\_naka@kuee.kyoto-u.ac.jp

## 1. はじめに

我々は、輸送機器応用を目指した高温超伝導誘導同期モータ (High Temperature Superconducting Induction/Synchronous Motor: HTS-ISM)の研究開発を推進している [1]。モータ設計では、電気装荷と磁気装荷の分配が重要であり [2]、同分配に際して固定子巻数とギャップ長の関係を系統的に理解する必要がある。本研究では、同一の 20 kW 級 HTS 回転子について、上記 2 つのパラメータを変化させた 2 種類の銅固定子を試作し、その特性を実験的かつ解析的に検討したので報告する。

## 2. 試作機の諸元と試験方法

Fig. 1には、20 kW級プロトタイプ機として開発したHTS回転子(BSCCOテープ材を使用)の外観写真を示す。また、Fig. 2には銅固定子(3相、8極、6/9短節集中巻)の外観写真を示す。Table Iには、上記固定子の仕様を示すが、外径は同一として、内径(回転子とのギャップ長)および巻数(素線径やスロット内占積率は同一として、並列数を1(巻数: 30)若しくは2(巻数: 15))を変化させた2種類のものを試作した。

## 3. 解析結果および試験結果と考察

Table IIには、2次元電磁界解析によって求めた等価回路定数を示す。固定子巻数とギャップ長の変化に伴って、予想通りの相違が得られた。さらに、Table IIIには液体窒素浸漬冷却条件(77 K)における試験結果を示す。Stator2の出力値は、Stator 1に比較してギャップ長が2倍にもかかわらず3~4倍に増大している。本結果は、起磁力が増加したことやギャップ磁束の空間高調波が低減したことが理由と考えられ、即ち、上記2つのパラメータの最適化が重要であることが示された。Fig. 3には、機械出力( $P_m$ )の試験結果と等価回路解析結果の一例(Stator 1の場合)を示すが、磁気飽和の影響が大きくなる高出力領域を除いて両者は良く一致している。講演当日には、上記解析結果に基づいて詳細を報告する。

### 謝辞

HTS 回転子と銅固定子(Stator1)の試作に際して、国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の援助を受けた。本研究は、国立研究開発法人 科学技術振興機構(JST)のプロジェクト“H24 年度戦略的創造研究推進事業 先進的低炭素化技術開発(ALCA)”「低炭素社会を支える輸送機器用超伝導回転機システム」の一環として実施されたものである。本研究に協力頂いた京都大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程・北野紘生氏(2013年3月修了)に謝意を表す。

### 参考文献

1. T. Nakamura, et al.: IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 25, no. 3 (2015.06) 5202304.
2. 竹内寿太郎, 他: 電気機器設計 (オーム社, 1989).

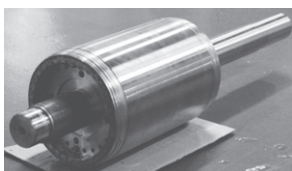


Fig. 1 Photograph of 20 kW class BSCCO rotor



Fig. 2 Photograph of 20 kW class Cu stator

Table I Specifications of 3-phase, 8-pole Cu stators

	Stator 1	Stator 2
Winding Configuration	6/9 short-pitch concentrated windings	
Number of turns	30	15
Air-gap length	0.30 mm	0.60 mm

Table II Analysis results of circuit constants

	Stator 1	Stator 2
Stator's resistance (mΩ)	200	50.0
Stator's self-inductance (mH)	174	33.6
Rotor's self-inductance (mH)	0.264	0.200
Mutual inductance (mH)	6.26	2.31

Table III Tested results of mechanical output at 60 Hz (900 rpm) and 77 K

Input voltage	Stator 1	Stator 2
160 V	1.15 kW	4.85 kW
240 V	3.16 kW	9.52 kW

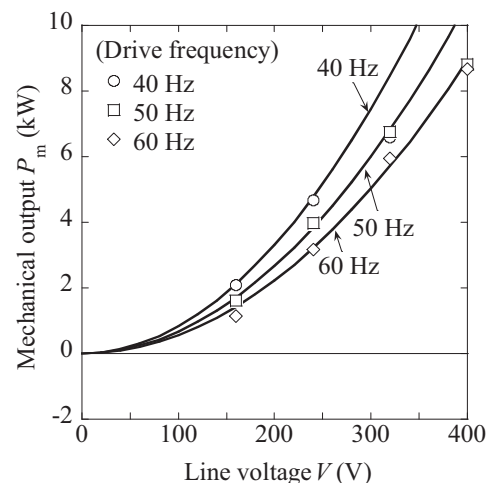


Fig. 3 Tested and analysis results of mechanical output ( $P_m$ ) vs. line voltage ( $V$ ) characteristics of stator 1, operated at 77 K (tested results: symbols, analysis results: curves)

## 20 kW 級高温超伝導誘導同期モータの過渡特性評価 — 可変速制御と JC08 相当試験結果

### Transient Characteristic Evaluation of HTS Induction/Synchronous Motor — Variable Speed Control and JC08 Mode Equivalent Test Results

村中 啓太郎, 中村 武恒, 雨宮 尚之 (京大); 伊藤 佳孝, 寺澤 俊久 (イムラ材研); 大橋 義正 (アイシン精機)  
MURANAKA Keitaro, NAKAMURA Taketsune, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto Univ.); ITOH Yoshitaka,  
TERAZAWA Toshihisa (IMRA MATERIAL); OHASHI Yoshimasa (AISIN SEIKI)  
E-mail: k-muranaka@asl.kuee.kyoto-u.ac.jp

#### 1. はじめに

我々は、輸送機器応用を目指した高温超伝導誘導同期モータ (High Temperature Superconducting Induction/Synchronous Motor: HTS-ISM)の研究開発を推進している[1]。本モータの特長として、すべり・同期運転の両立や、高トルク密度などが挙げられ、実験および解析によって様々な検証が行われてきた。輸送機器駆動モータは、負荷を負った状態で頻繁に加減速運転する必要があることから、可変速時においても高効率で駆動することが求められ、その特性解明は必要不可欠である。

本研究では、20 kW 級プロトタイプ機について可変速試験を行い、加減速モードが 3 種類存在することを実験と解析で検証した。さらに、JC08 相当の回転試験に初めて成功したので報告する。

#### 2. 対象とした回転機と試験方法

実験対象としたのは 20 kW 級 HTS-ISM であり、固定子には銅巻線が、回転子には HTS 巻線 (BSCCO テープ材) がそれぞれ使用されている。試験に際しては、液体窒素浸漬状態とし、急加速試験において市販の PWM (Pulse Width Modulation)インバータを用い、JC08 相当試験においてはVVVF (Variable Voltage Variable Frequency)制御が可能なインバータを用いた。

#### 3. 三種類の加減速モードの提案

我々は、加減速時間に応じて三種類のモード (1: 加減速中にすべり回転状態が継続, 2: すべり回転の途中から同期回転状態に移行, 3: 加減速開始時から同期回転状態維持)を仮定して検討を実施していた。ここで無負荷条件において、同期回転を維持しながらの加速に成功した実験結果の一例をFig. 1に示す(加速時間2.0 s)。

また、理論解析を行うために、HTS-ISMの電気系および機械系における伝達関数を用いて、ブロックダイアグラムを構成した(Fig. 2)。このモデルにおいて、パラメータを変えることで、上記3種類のモードが存在することを理論的に検証した。また、実験においても同様の傾向が見られた。

本モータは、すべり状態が継続すると、損失が発生することが分かっている。従って、高効率で可変速制御を行うためには、当該制御時においても可能な限り同期状態を維持する必要がある、本研究によって、その可能性が示された。

#### 4. JC08 走行モードに相当する試験

JC08走行モードは、自動車の燃費測定に用いられる方法の一つであり[2]、毎秒の指令速度が与えられている。また、自動車の重量や形状を仮定することで、要求トルクを算出することが出来る。この試験によって得られた効率から、輸送機器応用への適性を評価することが出来る。

今回、本モードの可変速試験に初めて成功したので報告する。無負荷条件における実験結果の一例をFig. 3に示す。

具体的な実験方法など、詳細は講演当日に報告する。

#### 謝辞

本研究は、国立研究開発法人 科学技術振興機構(JST)のプロジェクト“H24 年度戦略的創造研究推進事業 先進的低炭素化技術開発 (ALCA)”「低炭素社会を支える輸送機器用超伝導回転機システム」の一環として実施されたものである。

#### 参考文献

1. T. Nakamura, et al.: IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 25, no. 3 (2015.06) 5202304
2. J. Kühlwein, J. German and A. Bandivadekar, “Development of test cycle conversion factors among worldwide light-duty vehicle CO2 emission standards,” icct, Sep 2014

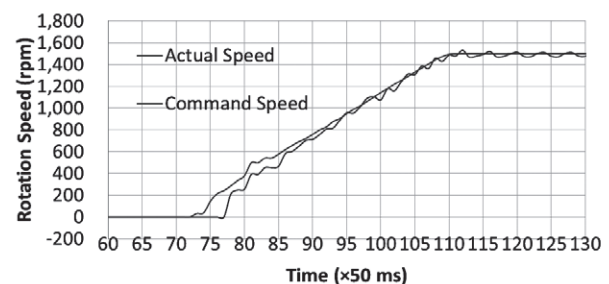


Fig. 1 Experimental results of acceleration test  
Acceleration time is 2.0 s

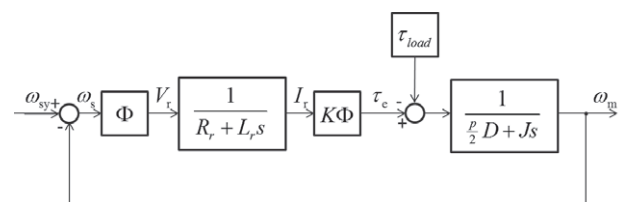


Fig. 2 Block diagram of variable speed control of HTS-ISM

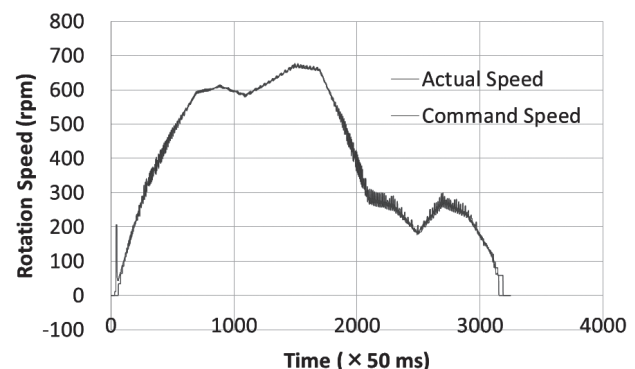


Fig. 3 Experimental results of part of JC08 mode

## 20 kW 級高温超伝導誘導同期モータの過渡特性評価 — 負荷時加速特性と過渡効率

### Transient Characteristic Evaluation of HTS Induction/Synchronous Motor — Loaded Starting Characteristic and Its Transient Efficiency

中村 武恒, 岡島 慎弥, 村中 啓太郎, 雨宮 尚之 (京大); 伊藤 佳孝, 寺澤 俊久 (イムラ材研);  
大橋 義正 (アイシン精機); 福井 聡 (新潟大)

NAKAMURA Taketsune, OKAJIMA Shinya, MURANAKA Keitaro, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto Univ.); ITOH Yoshitaka,  
TERAZAWA Toshihisa (IMRA MATERIAL); OHASHI Yoshimasa (AISIN SEIKI); FUKUI Satoshi (Niigata Univ.)

E-mail: tk\_naka@kuee.kyoto-u.ac.jp

#### 1. はじめに

我々は、輸送機器応用を目指した高温超伝導誘導同期モータ (High Temperature Superconducting Induction/Synchronous Motor: HTS-ISM)の研究開発を推進している[1]。輸送機器駆動モータは、常に負荷を負った状態にて加減速する必要があり、特にゼロ発進加速特性は重要な性能要件であるものの、超伝導モータではクエンチ(若しくは熱暴走)の危険もあり、これまであまり研究されていなかったと思われる。本研究では、20 kW級高温超伝導誘導同期モータについて、定格出力(20 kW)の1.5倍までの過負荷状態におけるゼロ発進特性を実験的に検証したので報告する。また、変動負荷制御[2]も想定した可変速制御技術確立を目指し、過渡効率の概念[3]を導入して加速特性を検討した。

#### 2. 20 kW 級プロトタイプ機の諸元と試験方法

Fig. 1には、20 kW級プロトタイプ機として開発したHTS回転子 (BSCCOテープ材を使用)の外観写真を示す。同回転子を、市販の銅固定子(3相, 4極)と組み合わせて、液体窒素浸漬状態として試験を実施した。Fig. 2には、試験ベンチの写真を示す[1]。負荷用永久磁石モータにて要求負荷を与えておき、市販のPWM (Pulse Width Modulation)インバータを使用して急加速試験を行った。

#### 3. 試験結果と考察

Fig. 3には、一例として要求負荷24.1 kW (定格出力(20kW)の1.205倍)の負荷を負った状態にて、加速時間0.5 sで始動した際の加速特性を示す。同図に示すように、プロトタイプ機は1 s以内に同期回転数 $N_s$  (= 1800 rpm)に引き入れられている。また、その後30 kWの過負荷においても同様の試験を実施し、1 s程度のゼロ発進に成功した。以上の結果から、HTS-ISMは自動車等への搭載を想定した急発進にも十分対応できるモータであることが実証された。なお、頻繁な加減速を繰り返す駆動モータにおいては、過渡回転状態における効率[3]も重要と考えられる。そこで、例えば加速特性を一次遅れ系として近似し、その時定数における過渡効率の定義も考えられる。本検討の現状など、詳細は講演当日に報告する。

#### 謝辞

本研究は、国立研究開発法人 科学技術振興機構(JST)のプロジェクト“H24 年度戦略的創造研究推進事業 先端的低炭素化技術開発 (ALCA)”「低炭素社会を支える輸送機器用超伝導回転機システム」の一環として実施されたものである。

#### 参考文献

1. T. Nakamura, et al.: IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 25, no. 3, 5202304 (2015).
2. M. Kato, et al.: IEEJ Transactions on Industry Applications, vol. 135, no. 10, 963 (2015) (in Japanese).
3. S. Fujii, et al.: Transactions of The Japan Society of Mechanical Engineers, vol. 36, no. 287, 1089 (1968) (in Japanese).

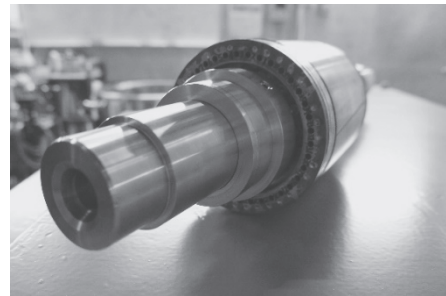


Fig. 1 Photograph of 20 kW class BSCCO rotor.

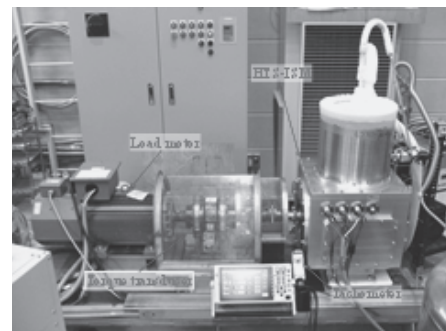


Fig. 2 Photograph of test bench [1].

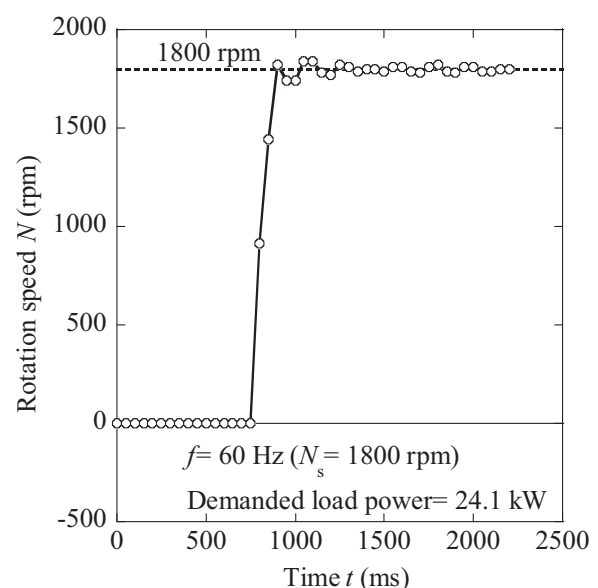


Fig. 3 Acceleration test result ( $N_s = 1800$  rpm, demanded load power: 24.1 kW).



# 20 kW 級高温超伝導誘導同期モータにおける定常最大効率マップの実験的評価

## Experimental Evaluation of Steady-state Maximum Efficiency Contour Map of 20 KW Class HTS Induction/Synchronous Motor

入山 周平, 中村 武恒, 岡島 慎弥, 雨宮 尚之 (京大); 伊藤 佳孝, 寺澤 俊久 (イムラ材研); 大橋 義正 (アイシン精機)  
 IRIYAMA Shuhei, NAKAMURA Taketsune, OKAJIMA Shinya, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto Univ.); ITOH Yoshitaka,  
 TERAZAWA Toshihisa (IMRA MATERIAL); OHASHI Yoshimasa (AISIN SEIKI)  
 E-mail: s-iriya@asl.kuee.kyoto-u.ac.jp

### 1. はじめに

我々は、輸送機器への適用を目指した高温超伝導誘導同期モータ (High Temperature Superconducting Induction/Synchronous Motor: HTS-ISM) の研究開発を行っている[1]。モータの効率は回転数や負荷により変化するため、効率マップは、その性能を評価するために重要な指標となる。本研究では、20 kW 級高温超伝導誘導同期モータについて、周波数ごとに負荷試験を行った。この試験結果に基づいて効率マップを評価したので報告する。

### 2. 20 kW 級試作機の諸元

Fig. 1には、試験に用いた20 kW級試作機の外観写真を示す。本機は、一般的なかご形誘導機の二次側巻線にHTS線材(BSCCOテープ材)を用いた構造となっており、固定子は3相4極の銅巻線となっている。冷却方法は、車載応用に際しては小型冷凍機による冷却を目標としているが、本研究では、液体窒素による浸漬冷却を行った。また、励磁には市販のPWM (Pulse Width Modulation)インバータを用いた。

### 3. 負荷試験

以上の条件及び、最大電流120 Aかつ最大負荷トルク180 Nmの制約条件の下、入力周波数10 Hz, 20 Hz, 30 Hz, 40 Hz, 50 Hz, 60 Hzのそれぞれの場合について負荷試験を行った。

Fig. 2には、異なる負荷トルクに対する効率の速度依存性を示す(入力電圧は、条件によって異なる)。低速回転領域において効率が低く、高速回転領域において効率が高くなる傾向を示しており、60 Hzの場合の同期速度1800 rpmにおいて最大効率94.7%が確認された。

Fig. 3では、50 Hzの場合における、異なる入力電圧に対する効率のトルク依存性を示す。同図から、低トルク領域では低電圧時に、高トルク領域では高電圧時に高効率となる傾向を持つことが分かる。

なお、本試験では、液体窒素の攪拌による機械損も損失に含まれるため、モータ単独ではさらに高効率となると考えられる。

試験や効率マップの詳細は講演当日に報告する。

### 謝辞

本研究は、国立研究開発法人 科学技術振興機構(JST)のプロジェクト“H24 年度戦略的創造研究推進事業 先端的低炭素化技術開発 (ALCA)”「低炭素社会を支える輸送機器用超伝導回転機システム」の一環として実施されたものである。

### 参考文献

1. T. Nakamura, et al.: IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 25, no. 3 (2015.06) 5202304.

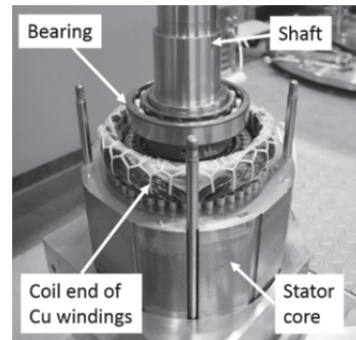


Fig. 1 Photograph of 20 kW HTS-ISM.

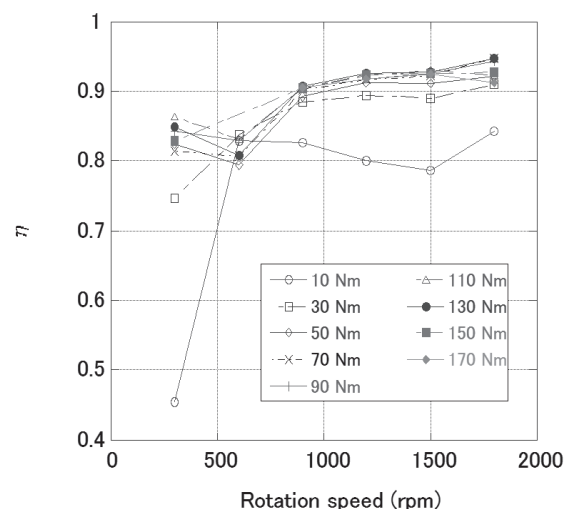


Fig. 2 Efficiency ( $\eta$ ) vs. rotation speed ( $N$ ) characteristics for different load torque.

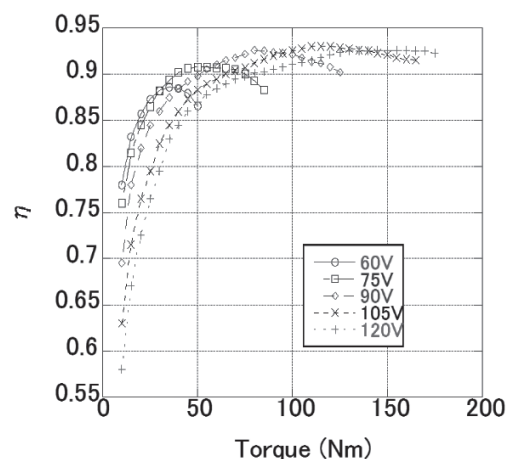


Fig. 3 Efficiency ( $\eta$ ) vs. load torque ( $\tau$ ) characteristics for different voltage ( $f = 50\text{Hz}$ )

## 20 kW 級高温超伝導誘導同期モータにおける過負荷時すべり出力の 最大化に関する実験的検討

### Experimental Study on Maximization of Overload Slip Output for 20 kW Class HTS Induction/Synchronous Motor

郭 思宇, 中村 武恒, 岡島 慎弥, 雨宮 尚之 (京大); 伊藤 佳孝, 寺澤 俊久 (イムラ材研); 大橋 義正 (アイシン精機)  
 GUO Siyu, NAKAMURA Taketsune, OKAJIMA Shinya, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto Univ.); ITOH Yoshitaka,  
 TERAZAWA Toshihisa (IMRA MATERIAL); OHASHI Yoshimasa (AISIN SEIKI)  
 E-mail: s-guo@asl.kuee.kyoto-u.ac.jp

#### 1. はじめに

我々は、輸送機器(電車, バス, 自動車 他)への実用を目指した高温超伝導誘導同期モータ(High Temperature Superconducting Induction/Synchronous Motor: HTS-ISM)の研究開発を実施している<sup>1)</sup>。輸送機器駆動モータには、始動時他に定格以上の短時間過負荷出力が要求され、本研究では、上記出力をすべりトルクで実現することを想定している。本報告では、20 kW 級 HTS-ISM を対象として、その励磁条件を最適化することで、上記すべり出力の最大化を実験的に検討したので報告する。

#### 2. 20 kW 級 HTS-ISM の構造

Fig. 1には、20 kW 級 HTS-ISM (3相, 4極)の HTS 回転子と銅固定子を示す<sup>1)</sup>。回転子巻線には Bi-2223 超伝導テープ導体を用いており、固定子巻線には並列銅線を用いている。上記組み合わせ HTS-ISM を、メタルクライオスタット内に収容して試験を実施した。なお、試作したモータは液体窒素中に浸漬されており、77K まで冷却されている。

#### 3. 試験方法

Fig. 2には、試験システムの結線図を示す。HTS-ISM を PWM (Pulse Width Modulation) インバータで励磁し、PM (Permanent Magnet) 負荷モータ(定格出力: 30 kW)によって回生した。その際、HTS-ISM 駆動用インバータおよび PM モータ用インバータの直流回路を相互接続することによって、PM モータで回収した電力を再度 HTS-ISM の励磁に利用することができる。本実験では、液体窒素浸漬冷却した HTS-ISM の励磁条件(電圧/周波数の値)を変化させて駆動し、従来のすべり出力最高値(26.8 kW)<sup>1)</sup>のさらなる更新を試みた。

#### 4. 実験結果と考察

Fig. 3には、線間電圧 250 V, 駆動周波数 60 Hz における負荷試験結果を示す。このとき、同期回転数( $N_s$ )は 1800 rpm である。同図に示すように、設計通りの定格同期出力 20 kW が得られている。そして、定格を超える過負荷を印加したところ、すべり出力が 41.3 kW にまで更新することに成功した。即ち、本実験によって定格同期出力の 2 倍以上の過負荷すべり出力が実現された。さらに、最大すべり出力時(41.3 kW)においても高い効率 90.4% が実現されることが分かった。詳細は講演当日に報告する。

#### 謝辞

本研究は、国立研究開発法人 科学技術振興機構(JST)のプロジェクト“H24 年度戦略的創造研究推進事業 先進的低炭素化技術開発(ALCA)”「低炭素社会を支える輸送機器用超伝導回転機システム」の一環として実施されたものである。

#### 参考文献

1. T. Nakamura et al., IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 25-3, 5202304 (2015).
2. T. Nakamura et al., Superconductor Science and Technology, 25, 014004 (2012).

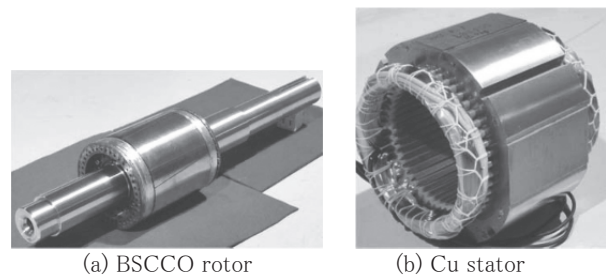


Fig. 1 Photographs of fabricated HTS rotor and Cu stator (3-phase, 4-pole)<sup>1)</sup>

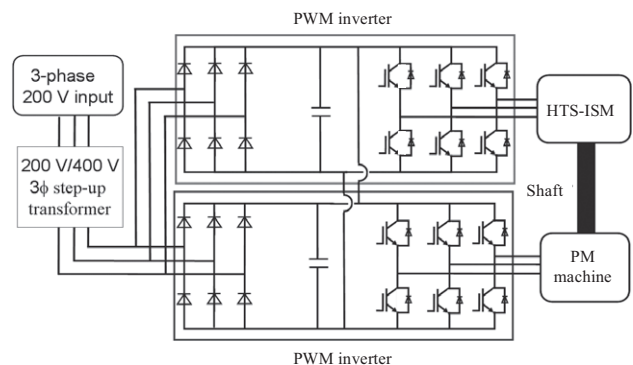


Fig. 2 Connection diagram of test system<sup>2)</sup>

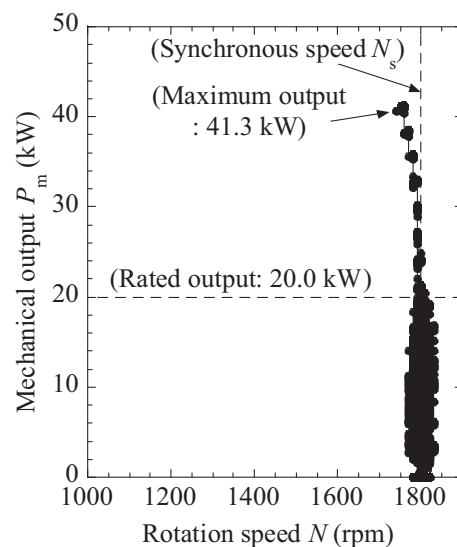


Fig. 3 Experimental result of load characteristic at 77 K ( $V = 250$  V,  $f = 60$  Hz)

## 20 kW 級高温超伝導誘導同期モータの履歴回転特性に関する実験的検討

### Experimental Study on Hysteretic Rotating Characteristics of 20 kW Class HTS Induction/Synchronous Motor

池田 健一, 中村 武恒, 雨宮 尚之 (京大); 伊藤 佳孝, 寺澤 俊久 (イムラ材研); 大橋 義正 (アイシン精機)  
IKEDA Kenichi, NAKAMURA Taketsune, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto Univ.); ITOH Yoshitaka,  
TERAZAWA Toshihisa (IMRA MATERIAL), OHASHI Yoshimasa (AISIN SEIKI)  
E-mail: k-ikeda@asl.kuee.kyoto-u.ac.jp

#### 1. はじめに

我々は、輸送機器応用を目指した高温超伝導誘導同期モータ (High Temperature Superconducting Induction/Synchronous Motor: HTS-ISM)の研究開発を推進している [1]。同機は、高効率同期回転や高安定可変速特性など、超伝導材料特有の非線形物理量である臨界電流を効果的に利用した高性能回転特性を実現可能である。一方で、上記物理量は回転特性に履歴 (ヒステリシス) を生み出し、例えば周波数固定の回転数—一次電圧依存性が電圧上昇時と下降時で異なる特性を示す。本研究では、上記ヒステリシス特性がモータの回転特性に及ぼす影響を実験的に検討したので報告する。

#### 2. 20 kW 級プロトタイプ機の諸元と試験方法

Fig. 1には、20 kW級プロトタイプ機として開発したHTS回転子 (BSCCOテープ材を使用)の外観写真を示す。同回転子を、市販の銅固定子 (3相, 4極) と組み合わせて試験を実施した。Fig. 2には、試験装置の外観写真を示す。試験に際しては、液体窒素浸漬状態とし、2種類の要求負荷 (20 kW (定格負荷), 10kW) について、入力電圧上昇時と下降時の定常回転特性を測定した。なお、本実験における入力電圧最高値は242.5 V (線間電圧) である。

#### 3. 試験結果と考察

Fig. 3には、要求負荷10kW, 20kWを負った状態にて、電圧を0 Vから242.5 Vまで上昇し、その後下降した場合の定常回転特性を示す。図に示すように、同機は要求負荷に依存して、同期引き入れ時ならびに同期外れ時の電圧が異なり、即ち履歴特性を示している。さらに、最大効率時における一次電圧も異なった。本結果から、HTS-ISMの最適制御を行う際には、上記履歴特性も考慮する必要があると考えられる。

実験方法の詳細や考察など、詳細は講演当日に報告する。

#### 謝辞

本研究は、国立研究開発法人 科学技術振興機構 (JST) のプロジェクト “H24 年度戦略的創造研究推進事業 先進的低炭素化技術開発 (ALCA)” 「低炭素社会を支える輸送機器用超伝導回転機システム」の一環として実施されたものである。

#### 参考文献

1. T. Nakamura, et al.: IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 25, no. 3 (2015.06) 5202304.

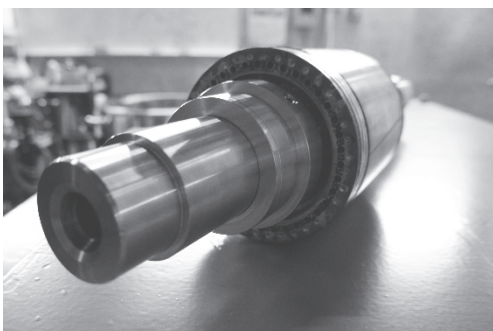


Fig. 1 Photograph of 20 kW class BSCCO rotor.

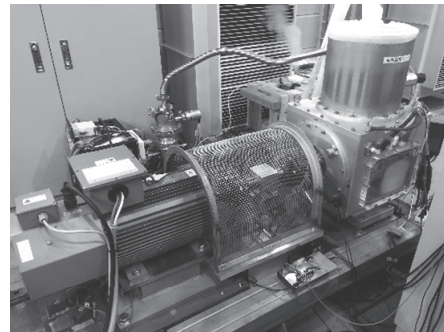
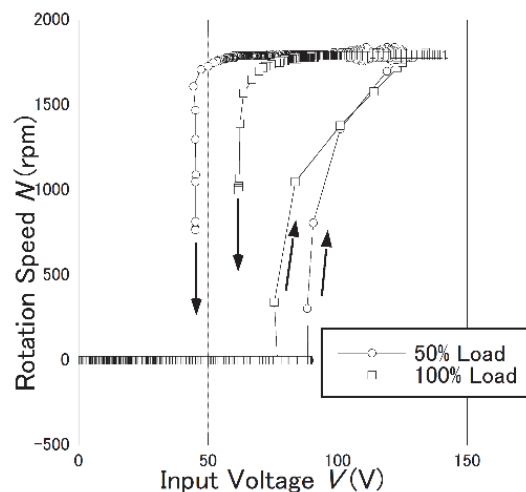
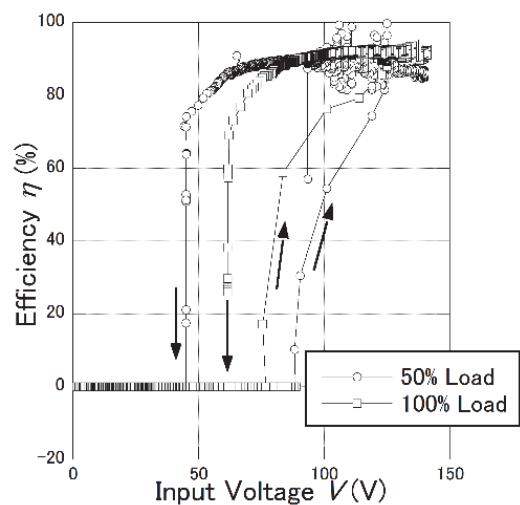


Fig. 2 Photograph of rotation test bench.



(a) Rotation speed



(b) Efficiency

Fig. 3 Experimental results of steady-state hysteretic rotation characteristics at 77 K.



## 20 kW 級高温超伝導誘導同期モータの駆動ならびに回生特性 に関する実験的検討

### Experimental Study on Drive and Regeneration Characteristics of 20 kW Class HTS Induction/Synchronous Motor

唐島 智治, 中村 武恒, 雨宮 尚之 (京大); 伊藤 佳孝, 寺澤 俊久 (イムラ材研); 大橋 義正 (アイシン精機)

KARASHIMA Tomoharu, NAKAMURA Taketsune, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto Univ.); ITOH Yoshitaka,

TERAZAWA Toshihisa (IMRA MATERIAL); OHASHI Yoshimasa (AISIN SEIKI)

E-mail: t-karashima@asl.kuee.kyoto-u.ac.jp

#### 1. はじめに

我々は、輸送機器(電車, バス,トラック, 自動車 他)への応用を目指した高温超伝導誘導同期モータ(High Temperature Superconducting Induction/Synchronous Motor: HTS-ISM)の研究開発を推進している[1]。本研究では、駆動モータシステム全体の高効率化の一環として、ブレーキ動作時の回生電力[2]を積極的に利用する制御系の開発を検討している。本講演では、20 kW 級 HTS-ISM を対象として、その駆動ならびに回生特性を実験的に評価したので報告する。

#### 2. 20 kW 級プロトタイプ機の諸元と試験方法

Fig. 1には、BSCCOテープ材を用いて試作した20 kW級 HTS回転子の外観写真を示す。本回転子とCu固定子(3相, 4極, 分布巻)を組み合わせて駆動モータを構成した。また, Fig. 2には上記駆動モータを収容・冷却するクライオスタットの外観写真を示す。試験に際して、モータ本体は液体窒素浸漬状態とし、市販のPWM (Pulse Width Modulation)インバータを使用して励磁した。また、HTS-ISMの負荷側には永久磁石モータ(定格出力: 30 kW)を接続した。回生試験では、HTS-ISMを励磁した状態で、永久磁石モータを強制回転させることにより発電させた。Fig. 3には、試験回路図を示す。

#### 3. 試験結果と考察

Fig. 4には、HTS-ISMを励磁した状態で、機械入力トルクを増加させた際の回転数・効率特性を示す。同図で確認できるように、HTS-ISMは同期状態を維持したまま出力15 kW付近まで発電することができ、機械損が含まれているにもかかわらず最大で92%の回生効率が実現されている。具体的な実験の方法や駆動特性との対比など、詳細は講演当日に報告する。

#### 謝辞

本研究は、国立研究開発法人 科学技術振興機構(JST)のプロジェクト“H24 年度戦略的創造研究推進事業 先進的低炭素化技術開発 (ALCA)”「低炭素社会を支える輸送機器用超伝導回転機システム」の一環として実施されたものである。

#### 参考文献

1. T. Nakamura, et al.: IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 25, no. 3, 5202304 (2015).
2. T. Nakamura, et al.: TEION KOGAKU, vol. 44, no. 3, pp. 112-119 (2009) (in Japanese).
3. T. Nakamura, et al.: Superconductor Science and Technology, 25, 014004 (2012).

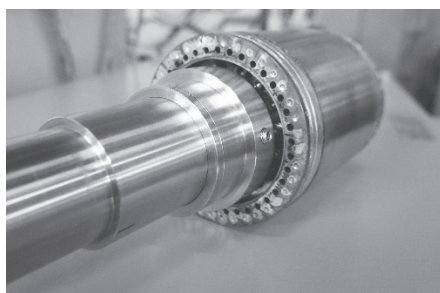


Fig. 1 Photograph of 20 kW class BSCCO rotor.



Fig. 2 Photograph of 20 kW class HTS-ISM [1].

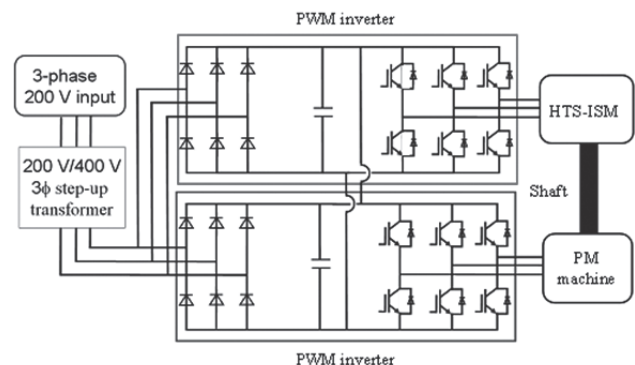


Fig. 3 Connection diagram of test system [3].

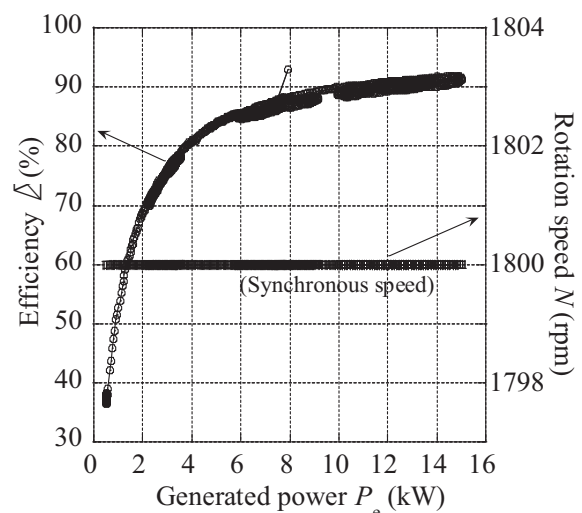


Fig. 4 Tested result of regeneration characteristics of 20 kW class HTS-ISM at 77 K.

## 20 kW 級高温超伝導誘導同期モータシステムにおける 熱負荷の定常ならびに過渡特性

### Steady and Transient Characteristics of Heat Load in 20 kW Class HTS Induction/Synchronous Motor System

渡邊 潤, 中村 武恒, 入山 周平, 雨宮 尚之 (京大); 伊藤 佳孝, 寺澤 俊久 (イムラ材研); 大橋 義正 (アイシン精機)

WATANABE Jun, NAKAMURA Taketsune, IRIYAMA Shuhei, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto Univ.); ITOH Yoshitaka, TERAZAWA Toshihisa (IMRA MATERIAL); OHASHI Yoshimasa (AISIN SEIKI)

E-mail: j-watanabe@asl.kuee.kyoto-u.ac.jp

#### 1. はじめに

我々は、輸送機器応用を目指した高温超伝導誘導同期モータ (High Temperature Superconducting Induction/Synchronous Motor: HTS-ISM) とそのシステム化に向けた研究開発を実施している[1]。本研究では、定常状態ならびに過渡状態における回転特性から、20kW 級プロトタイプ機の熱負荷を評価した。さらに、モータ駆動時のクライオスタット各部の温度分布およびその時間変化を計測し、熱伝達特性や最適冷却構造を検討したので報告する。

#### 2. 20 kW 級プロトタイプ機の諸元

Fig. 1には、20 kW級プロトタイプ機として開発したHTS回転子の外観写真を示す。本試験に際しては、液体窒素浸漬状態とし、市販のPWM (Pulse Width Modulation)インバータを使用して励磁した。

#### 3. 熱負荷の評価方法および温度変化測定方法

本研究では、無負荷試験、拘束試験および機械損測定試験を行った。これらの結果からHTS-ISMの等価回路定数を算出し、熱負荷を解析的に評価した。

続いて、クライオスタット内部の固定子、シャフトの負荷側およびリア側にT型熱電対を取り付け、無負荷同期回転時および負荷回転時のクライオスタット各部の温度分布とその時間変化を測定した。Fig.2 には、クライオスタット内の軸シール部の構造および熱電対の取り付け位置の概略図を示す。試験に際しては、液体窒素の封入圧は一定(0.07 MPa)とした。

#### 4. クライオスタット内の温度変化測定結果

本講演概要では、無負荷同期回転時のクライオスタット内の温度変化結果の報告のみを行う。Fig. 3には、無負荷同期回転時の回転数およびシャフト負荷側の温度分布を示す。図より、シャフト軸上に温度勾配が形成されていることが確認できる。シャフト軸上に窒素ガスを発生させて温度勾配を形成することによって、軸方向のシールが実現できている。また、Temp. 4が駆動時に77 Kから急激に上昇しているのは、駆動に伴い、駆動前に液体窒素に浸っていた部分にガスが発生し、温度勾配を形成しているためだと考えられる。

また、負荷回転時の温度変化測定結果に基づき、HTS-ISMの定格は、従来のモータとは異なり、示強性の温度ではなく、示量性の発熱に対して定義する必要があるという、新たな提案を行う。

熱負荷の評価や負荷回転時の温度変化測定結果等の具体的な内容は、講演当日に報告する。

#### 謝辞

本研究は、国立研究開発法人 科学技術振興機構(JST)のプロジェクト“H24 年度戦略的創造研究推進事業 先進的低炭素化技術開発 (ALCA)”「低炭素社会を支える輸送機器用超伝導回転機システム」の一環として実施されたものである。

#### 参考文献

1. T. Nakamura, et al.: IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 25, no. 3 (2015.06) 5202304.

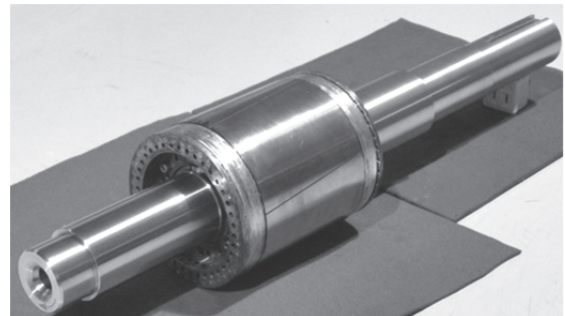


Fig. 1 Photograph of 20 kW class HTS rotor

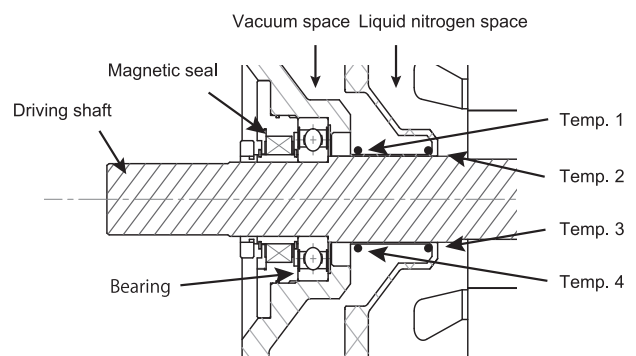


Fig. 2 Schematic diagram of shaft sealing part in cryostat for 20 kW class HTS-ISM

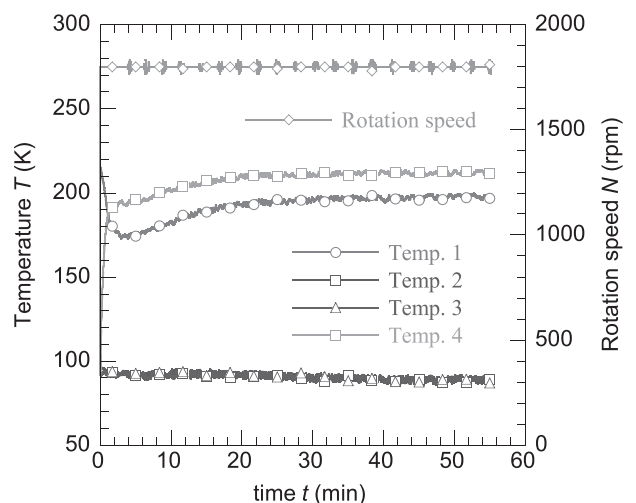


Fig. 3 Experimental result of temperature change at no-load condition in cryostat for 20 kW class HTS-ISM



## 垂直巻高温超伝導ステータの提案と基礎特性評価

### Proposal and Fundamental Characteristic Evaluation of HTS Stator Employing Ring Winding Configuration

吉川 雅章, 伊藤 佳孝, 寺澤 俊久(イムラ材研); 入山 周平, 中村 武恒, 雨宮 尚之(京大)

YOSHIKAWA Masaaki, ITOH Yoshitaka, TERAZAWA Toshihisa (IMRA MATERIAL);

IRIYAMA Shuhei, NAKAMURA Taketsune, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto Univ.)

E-mail: yossi@ai-i.aisin.co.jp

#### 1. はじめに

我々は、輸送機器への実用を目指した高温超伝導誘導同期モータ(HTS-ISM: High Temperature Superconducting Induction/Synchronous Motor)の研究開発を実施している。本講演では、HTS コイルに適したステータの巻線構造として垂直巻(Ring winding)を提案する。一次コイルを HTS 線材で作製する場合、その形状の制約により銅巻線誘導機で一般的な分布巻は困難である。これまでは集中巻のコイル配置を検討してきたが[1]、ギャップ磁束分布の点で分布巻より不利となる。垂直巻配置の採用で、磁場分布を改善してトルクを向上させることが可能であることを電磁界解析により明らかにし、HTS コイルの通電特性向上に関しても有効であることを実験的に確認したので報告する。

#### 2. 電磁界解析

電磁界解析は JMAG Designer((株)JSOL)を使用した。Table.1 に解析モデルの諸元、Fig.1(a)に垂直巻ステータの解析モデル、Fig.1(b)に比較のための集中巻ステータの解析モデルを示す。垂直巻では各コイルはステータコアの内周と外周にわたるように巻かれており、その軸線は径方向に垂直となる。一相一極は隣接する 10 ターンコイル 2 個で構成され、合計 20 ターンである。比較の集中巻は一相一極 1 コイル 20 ターンとなっている。

#### 3. コイル通電特性評価

垂直巻ステータにおけるコイルの特性を評価するため実際にコイルを作製し電流電圧特性を測定した。コイルは Bi 系 HTS 線材(DI-BSCCO Ic200A)で作製しダブルパンケーキ3並列巻 10 ターンとした。ただし測定においては線材間を直列接続して各線材の発生電圧を測定している。

#### 4. 結果と考察

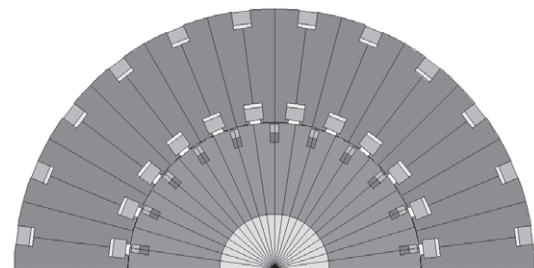
電磁界解析の結果、同一の電流駆動条件(10Hz-300A)における発生トルクは集中巻(b)の528Nm に対して、垂直巻(a)では659Nmとなり約 25%トルクが向上している。これは垂直巻にすることでステータの発生するギャップ磁束密度分布の空間高調波成分が減少したことによるものと考えられる。また Fig.2 に示すように垂直巻の配置でコアに巻いたコイルの直流  $I_c$  は空芯で同じ形に巻いたコイルよりも高く、単線ではほぼ 150A である。3並列の巻線すべてに等しく流れるとすればコイルとしての  $I_c$  は 450A になる。 $I_c$  の向上は HTS 線材にかかる磁場のテープ面に垂直な方向の成分が減少することによると考えられる。これらの結果をもとに 50kW 級全超伝導 HTS-ISM の設計検討をすすめている。

#### 謝辞

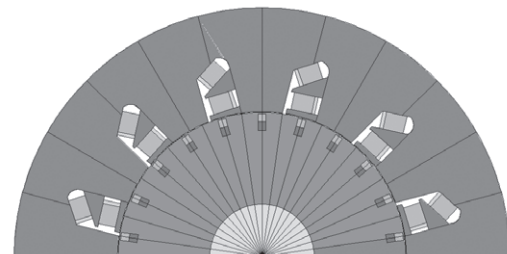
本研究は、国立研究開発法人 科学技術振興機構(JST)のプロジェクト“H24 年度戦略的創造研究推進事業 先進的炭素化技術開発(ALCA)”「低炭素社会を支える輸送機器用超伝導回転機システム」の一環として実施されたものである。

Table.1 Specifications of Models for analysis

	Ring winding	Concentrated winding
Stator OD	294mm	285mm
Stator ID	160.7mm	
Rotor OD	160.0mm	
Rotor ID	60mm	
Gap	0.35mm	
Length	100mm	
Number of Coils	24	12
Turns / coil	10	20
Rotor bar	22	



(a) Ring winding stator



(b) Concentrated winding stator

Fig.1 Models for electromagnetic analysis

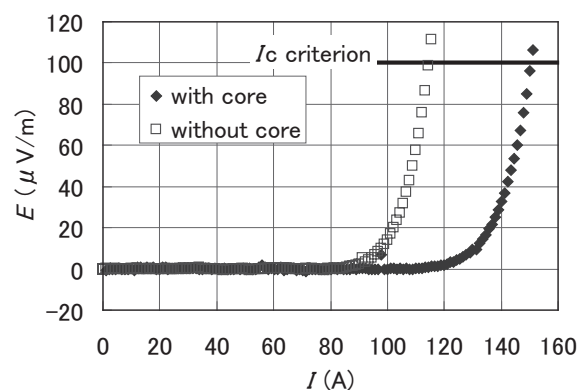


Fig.2  $I$ - $E$  curves of HTS coils measured at 77K

#### 参考文献

1. T. Nishimura, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 91 (2015) p.19

## 直接駆動輸送機器応用を指向した 50 kW 級全超伝導誘導同期モータの電磁設計と特性解析

### Electromagnetic Design and Characteristic Analysis of 50 kW Class Fully Superconducting Induction/Synchronous Motor Aiming for Direct-drive Transportation Equipment Application

吉川 雅章 (イムラ材研); 中村 武恒, 入山 周平, 渡邊 潤 (京大); 伊藤 佳孝, 寺澤 俊久 (イムラ材研); 雨宮 尚之 (京大); 大橋 義正 (アイシン精機); 古瀬 充穂 (産総研); 福井 聡 (新潟大)  
YOSHIKAWA Masaaki (IMRA MATERIAL); NAKAMURA Taketsune, IRIYAMA Shuhei, WATANABE Jun (Kyoto Univ.); ITOH Yoshitaka, TERAZAWA Toshihisa (IMRA MATERIAL); AMEMIYA Naoyuki (Kyoto Univ.); OHASHI Yoshimasa (AISIN SEIKI), FURUSE Mitsuo (AIST); FUKUI Satoshi (Niigata Univ.)  
E-mail: tk\_naka@kuee.kyoto-u.ac.jp

#### 1. はじめに

我々は、輸送機器用高温超伝導誘導同期モータ(High Temperature Superconducting Induction/Synchronous Motor: HTS-ISM)の研究開発を推進しており、これまで 20 kW 級プロトタイプ機(固定子: 銅, 回転機: HTS)について、上記実現可能性を実証してきた[1]。本研究では、さらなる高効率化、および直接駆動(ダイレクトドライブ)を可能にする高トルク密度化を目指し、全超伝導 50 kW 級モデル機の検討を進めている。本講演では、上記モデル機の電磁設計結果と基礎特性解析結果を報告する。

#### 2. 50 kW 級全超伝導モデル機の諸元と解析モデル

Fig. 1には、50 kW級全超伝導モデル機(3相, 4極)の2次元電磁界解析モデルを示す。本研究では、HTS巻線としてビスマス系ならびに希土類系線材の両者を検討している。希土類系線材についても良好な特性が得られつつあるが[2]、本報告ではビスマス系線材を使用した検討結果について報告する。固定子巻線法としては、新しく提案している垂直巻構成[3]を適用し(並列導体を想定)、定トルク(低速)領域における最大出力時(50 kW)同期回転数を300 rpm(駆動周波数: 10 Hz)と設定し、即ち当該出力時トルク目標値を1600 Nmとした。なお、HTS固定子巻線ならびにHTS回転子巻線の電流輸送特性(臨界電流 $I_c$ , n値)については、これまでの研究実績に基づく特性を用いた。

#### 3. 設計結果と考察

Table 1には、電磁設計結果を示す。またFig. 2には、設計したモデルについて得られたトルク特性の解析結果を示す。固定子外径が318.0 mm, コア長が140.0 mmであることから、磁気体積は約 $1.112 \times 10^7 \text{ mm}^3 = 11.12 \text{ L}$ となる。同図から明らかなように、0.2 s経過後からトルクが発生し、0.3 s後には1600 Nmに到達している。なお、このときのトルク密度は143.9 Nm/Lとなる。本トルク値は、ミドルクラス自動車のゼロ発進時に必要なトルク値であり、即ち直接駆動モータの実現可能性が示されている。

固定子ならびに回転子巻線の具体的構成や解析方法など、詳細は講演当日に報告する。

#### 謝辞

本研究は、国立研究開発法人 科学技術振興機構(JST)のプロジェクト“H24 年度戦略的創造研究推進事業 先進的低炭素化技術開発(ALCA)”「低炭素社会を支える輸送機器用超伝導回転機システム」の一環として実施されたものである。

#### 参考文献

1. T. Nakamura, et al.: IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 25, no. 3 (2015.06) 5202304.
2. M. Furuse, et al.: IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 25, no. 3 (2015.06) 5200504.
3. M. Yoshikawa, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, vol. 92 (2015) 3A-a10.

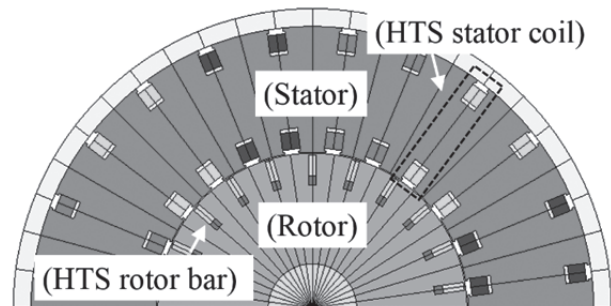


Fig. 1 Electromagnetic model of 50 kW class fully superconducting HTS-ISM

Table 1 Designed result of 50 kW class model HTS-ISM

Stator	OD	318.0 mm
	ID	176.0 mm
Rotor	OD	174.8 mm
	ID	50.0 mm
Gap length		0.6 mm
Core length		140.0 mm
Number of HTS coils		24
Turn number/coil		12
Number of rotor bars		22
$I_c$ , n-value of one rotor bar		6000 A, 17

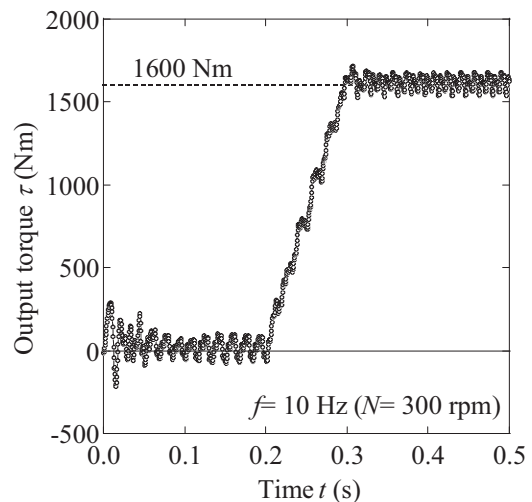


Fig. 2 Analysis result of temporal variation of electromagnetic torque ( $\tau$ )

# 希土類系線材を適用した極低温冷媒移送ポンプ用高温超伝導誘導同期モータの試作と特性評価

## Fabrication and Characteristic Evaluation of HTS Induction/Synchronous Motor using RE-system Coated Conductor for Cryogen Circulation Pump

中村 武恒 (京大); 今川 信作 (NIFS)

NAKAMURA Taketsune (Kyoto Univ.); IMAGAWA Shinsaku (NIFS)

E-mail: tk\_naka@kuee.kyoto-u.ac.jp

### 1. はじめに

核融合炉における高度電力システム技術開発の一環として、超伝導マグネット冷却用極低温冷媒循環移送ポンプを指向した高効率高温超伝導誘導同期モータ[1]の研究開発を実施している。具体的には、当該モータの広範な要求負荷に対する高効率特性を利用し、上記マグネット冷凍システムで要求される冷媒の流動特性を制約としたポンプ用モータを検討している。本講演では、Gd系高温超伝導テープ材を使用して、5 kW 級機的设计、試作、および試験を実施したので報告する。

### 2. 5 kW 級モデル機的设计と諸元

Fig. 1には、試作に用いたCu固定子と回転子コアの外観写真を示す。市販のCu固定子(3相, 4極, 定格電圧: 200 V)を利用して、HTS回転子の設計・試作を行った。HTS線材としては、SuperPower社製の希土類系テープ材(幅: 3.1 mm程度, 厚み: 95  $\mu\text{m}$ 程度, 臨界電流最小値: 85 A(77 K, 自己磁界), 臨界電流のバラつき:  $\pm 10\%$ 以下)を使用した。

### 3. 設計結果と試作

Fig. 2には、非線形等価回路[1]に基づいて得られた最大同期出力( $P_{sm}$ ) vs. HTSロータバー1本当りの臨界電流( $I_{c,rotor}$ )特性を示す。同図から、5 kWを出力するための $I_{c,rotor}$ として415 Aと決定される。ロータバーは、HTS線材をバンドルして作製する。自己磁界に伴う $I_c$ の低下を経験的に30%と仮定し、バンドル数を7と決定した(ロータバー全体の $I_c$ : 85 A/本 $\times$ 7本 $\times$ 0.7 $\approx$ 416 A)。Fig. 3には、試作したHTSロータバーの外観写真を示す。同一のロータバーを44本作製し、その後回転子スロットに挿入すると共に、ビスマス系高温超伝導テープ材を用いてハンダ接続してかご形回転子巻線を完成した。Fig. 4には、完成したHTS回転子の写真を示す。

設計・試作の詳細や負荷試験の結果など、詳細は講演当日に報告する。

### 謝辞

本研究は、核融合科学研究所・一般共同研究の一環として行われた。

### 参考文献

1. T. Nakamura, et al.: Superconductor Science and Technology, vol. 20, pp. 911-918 (2007).

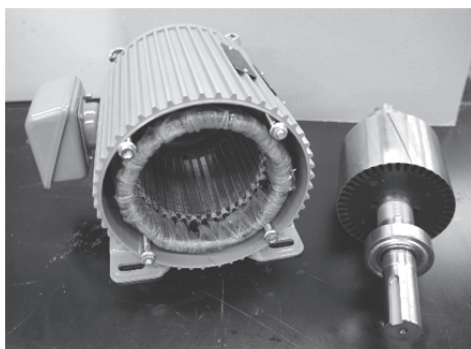


Fig. 1 Photograph of Cu stator and rotor core

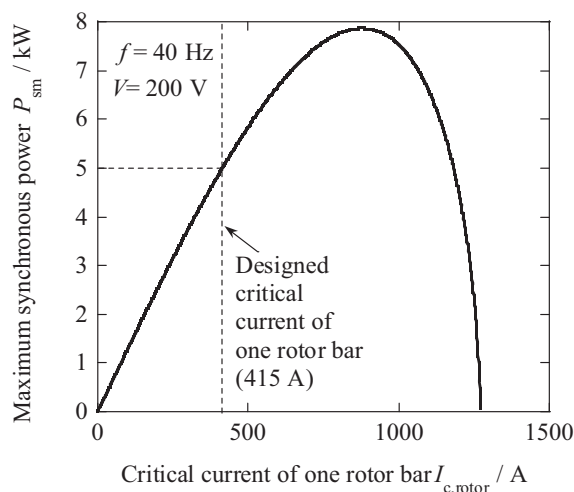


Fig. 2 Calculated result of maximum synchronous power ( $P_{sm}$ ) vs. critical current of one rotor bar ( $I_{c,rotor}$ ) at  $f = 40$  Hz and  $V = 200$  V.

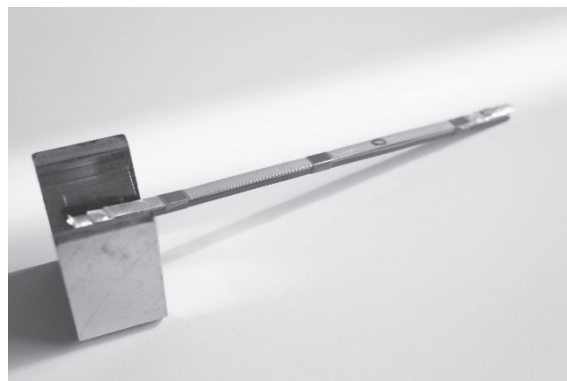


Fig. 3 Fabricated HTS rotor bar.

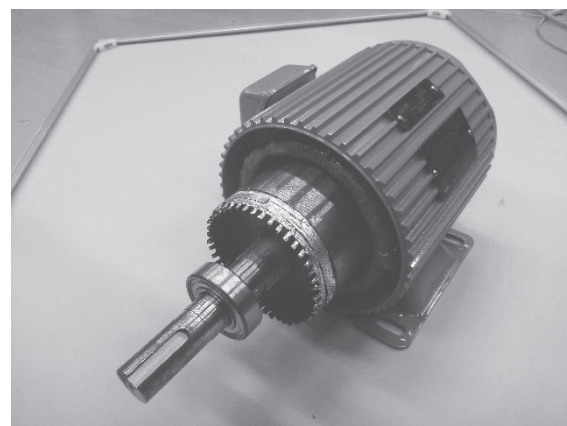


Fig. 4 Completed 5 kW class HTS-ISM



## 無冷媒 25T 超伝導マグネット建設の経緯と励磁試験の概要

### Outline of the construction status and its related performance of the cryogen-free 25T superconducting magnet

渡辺和雄、淡路智、小黒英俊 (東北大); 宮崎寛史、戸坂泰造、高橋政彦、瀧上浩幸、花井哲、井岡茂 (東芝)  
 K. Watanabe, S. Awaji, T. Oguro (Tohoku Univ.); H. Miyazaki, T. Tosaka, M. Takahashi, H. Takigami, S. Hanai, S. Ioka (Toshiba)  
 E-mail: kwata@imr.tohoku.ac.jp

#### 1. はじめに

日本学術会議のマスタープランに登録されているわが国の強磁場施設計画として、国内の主要な強磁場施設の連携によりオールジャパン体制で運営する強磁場フォーラムが構築されて強磁場科学の発展が図られている。Fig.1 に示すように、定常強磁場は東北大学金属材料研究所と物質・材料研究機構の共同運営組織による統合施設へと集約・発展させ、つくば地区に世界最高水準の 50T 級ハイブリッドマグネット、仙台地区に 30T 級超伝導マグネットを配置し、一体的な運用する計画である。パルス強磁場については東京大学物性研究所を主たる拠点として整備し、非破壊型ロングパルスで 100T、破壊型ショートパルスで 1000T までをカバーした物性研究を実施する。大阪大学は超強磁場・超高压・極低温の複合極限科学の拠点として、西日本のサブセンターとして機能させる。本計画は、補正予算により一部が前倒しで認められ、大阪大学のロングパルス発生用コンデンサーバンクと東北大学金研の無冷媒 25T 超伝導マグネットの建設が進められた。

本稿では、次期定常強磁場施設計画における無冷媒 30T 超伝導マグネットの実現に向けて、その R&D を兼ねて磁気科学研究用として建設した無冷媒 25T 超伝導マグネットの性能試験結果の概要について報告する。

#### 2. 無冷媒 25T 超伝導マグネットの設計概要[1]

これまでに、液体ヘリウム浸漬冷却を用いない GM 冷凍機による伝導冷却方式として無冷媒 25T-52mm 室温ボア超伝導マグネットの設計を報告してきた[1]。NbTi ラザフォードケーブルコイル、CuNb/Nb3Sn ラザフォードケーブルコイル及び Gd123 または Bi2223 高温超伝導 HTS コイルからなる構成である。低温超伝導 LTS コイルは 300mm コールドボア中心に 14T を発生して、その内側に 11T 発生 HTS コイルが内挿されて独立に 2

電源で運転される。

#### 3. 無冷媒 25T 超伝導マグネットの性能試験項目

数多くの性能試験項目に関して、主要な試験結果を報告する。

- 1) 世界初のリアクト&ワインド法 Nb3Sn ラザフォードケーブル 14T-LTS コイルの励磁試験として、無冷媒型コイルの冷却特性、交流損失と温度上昇、ラザフォードコイルのトレーニング見極め、コイル定格電流励磁試験
- 2) 世界初の実用 52mm 室温ボア Gd123 と Bi2223 テープ 11T-HTS コイルの励磁試験として、無冷媒型コイルの冷却特性、交流損失と温度上昇、テープ線材の遮蔽電流による発生磁場ヒステリシス、6K におけるコイル定格電流励磁試験
- 3) Gd123 と Bi2223 実機 4 層コイルによる定格耐電磁力試験として、実機コイル試験用の無冷媒温調クライオスタット製作、11T-360mm 室温ボア超伝導マグネットとの組合せ試験、10K における 11T バックアップ磁場中での定格耐電磁力試験 (14T バックアップ磁場相当)、77K における健全性確認用の通電試験
- 4) 無冷媒 25T 超伝導マグネットの 14T-LTS コイルと 10.5T-HTS コイル組合せ励磁試験: Gd123-HTS コイルと Bi2223-HTS コイル

#### 謝辞

本研究の一部は科学研究費補助金(基盤 A)の助成を受けています。

#### 参考文献

- [1] K. Watanabe et al., J. Phys. Conf. Ser. 568 (2014) 032019.

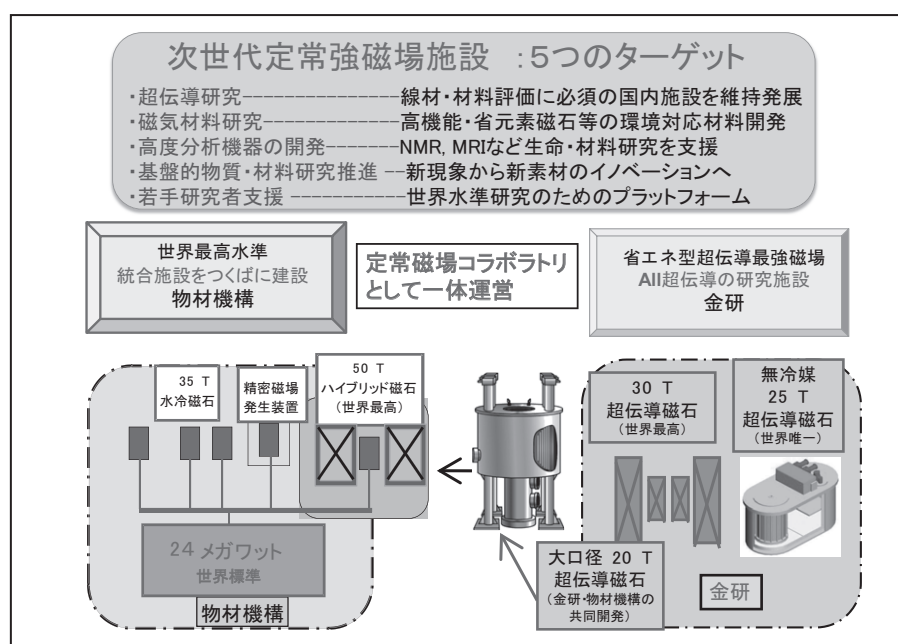


Fig.1 次期定常強磁場施設建設計画

# 無冷媒 25T 超伝導マグネット用の高強度 Nb<sub>3</sub>Sn ラザフォードケーブル開発のまとめ

## Summary of high-strength Nb<sub>3</sub>Sn Rutherford cable developments for a Cryogen-Free 25T superconducting magnet

杉本 昌弘, 坪内 宏和, 片山功多, 遠藤 壮, 高木 亮, 清水仁司(古河電工); 渡辺 和雄, 淡路 智, 小黒 英俊(東北大)  
 SUGIMOTO Masahiro, TSUBOUCHI Hirokazu, KATAYAMA Kota, ENDOH Sakaru, TAKAGI Akira,  
 SHIMIZU Hitoshi (Furukawa Electric Co., Ltd.); WATANABE Kazuo, AWAJI Satoshi, OGURO Hidetoshi (Tohoku Univ.)  
 E-mail: masahiro@nikko.furukawa.co.jp

### 1. はじめに

無冷媒 25T 超伝導マグネット(25T-CSM)には、リアクト・アンド・ワインド(R&W)型高強度 Nb<sub>3</sub>Sn ラザフォードケーブルが適用された[1],[2]。そのケーブルは、Nb-rod 法 Cu-Nb 強化材で内部強化された、直径 0.8mm のブロンズ法 Nb<sub>3</sub>Sn 素線 16 本で構成され、熱処理後、適正な事前曲げ歪を印加することにより性能向上が図られた[3],[4]。ここでは、一連の開発成果について報告する。

### 2. 開発導体[4]

25T-CSM に適用した Cu-Nb 内部強化型 Nb<sub>3</sub>Sn 素線およびラザフォードケーブルの断面写真を Fig.1 に示す。Cu-Nb 強化材は、製造性だけでなく低温特性が従来の In-situ 法よりも優れた新しい製造法(Nb-rod 法: Cu 母材の中に Nb ロッドを多数本埋め込む手法)で製作した。この Cu-Nb 強化型 Nb<sub>3</sub>Sn 素線の 14.5T、4.2K における機械特性は、0.2%耐力が 325~350MPa であり、ヤング率が約 190GPa であった。総長 153km の素線が量産され、7.8km 長のケーブル製造が行われた。

### 3. 事前曲げ歪印加による超伝導性能の向上

Cu-Nb/Nb<sub>3</sub>Sn 線材の Nb<sub>3</sub>Sn 超伝導体に残留する圧縮歪は、強化材が無い線材よりも大きくなるが、適正な事前曲げ歪印加処理により、使用条件下での超伝導特性を向上させることができる。Nb<sub>3</sub>Sn 生成熱処理(670°C×96h)後のプロトタイプケーブルのフラットワイズ方向に、異なる正方向の繰り返し曲げ歪  $\epsilon_{pb}$  を印加し、素線レベルでの臨界電流( $I_c$ )特性と比較した。この曲げ歪  $\epsilon_{pb}$  は、曲げ歪印加用のプーリー直径、素線直径、熱処理ボビンの胴径を用いて算出された。Fig.2 に示すように、ラザフォードケーブルから取り出した素線において、0.5%~1%の事前曲げ歪印加によって、素線と同様に、安定した  $I_c$  の向上が確認された[4]。この結果から、素線レベルでの  $I_c$  特性を用いて、ケーブルの  $I_c$  特性を予測できるという知見が得られた。

### 4. 25T-CSM 用 Nb<sub>3</sub>Sn ラザフォードケーブルの性能評価

ケーブルのフラットワイズ方向に繰り返し曲げ歪  $\epsilon_{pb}=\pm 0.5\%$  を印加するために、素線直径 0.8mm に対して、熱処理ボビン胴径 500mm、正方向曲げ歪プーリー直径 125mm、逆方向曲げ歪プーリー直径 250mm を選択した。 $I_c$  および  $n$  値の引張応力依存性を Fig.3 に示す[4]。事前曲げ歪の印加によって、少なくとも 260MPa までの引張応力下において、 $I_c$  が向上し、 $n$  値の低下もなかった。この結果から、 $\epsilon_{pb}=\pm 0.5\%$  の事前曲げ歪の印加が、25T-CSM 用ラザフォードケーブルの最大引張応力 251MPa に対し有効であることが確認された。

### 5. まとめ

Nb-rod 法 Cu-Nb 強化型 Nb<sub>3</sub>Sn 線材を用いたラザフォードケーブルの開発に成功した。繰り返し曲げ戻し歪 $\pm 0.5\%$ を印加することにより、R&W 法で製造される 25T-CSM 用 Nb<sub>3</sub>Sn 導体の要求特性を満足した。今後、このタイプの線材は、R&W 法 Nb<sub>3</sub>Sn コイルの実用化を進展させるために、重要な役割を担っていくことが期待される。

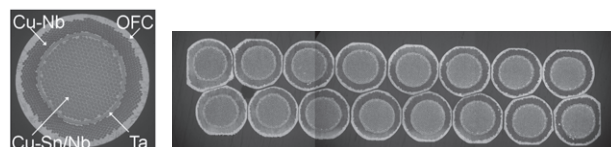


Fig.1 Nb-rod-method Cu-Nb/Nb<sub>3</sub>Sn strand and the Rutherford Cable (6.45mm<sup>w</sup> x 1.53mm<sup>t</sup>) for 25T-CSM

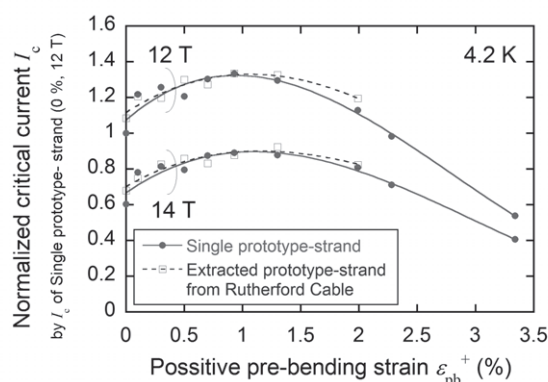


Fig.2  $I_c$  dependence of Prototype strand and the extracted strand from the Rutherford cable on positive pre-bending strain.

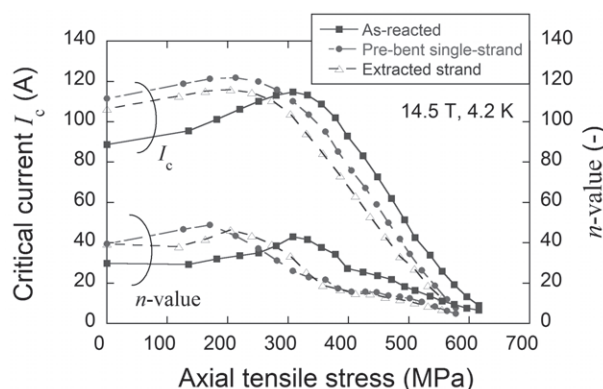


Fig.3 Dependence of  $I_c$  and  $n$ -value of Cu-Nb/Nb<sub>3</sub>Sn for 25T-CSM on axial tensile stress at 14.5T, 4.2K.

謝辞: 本研究の一部は科学研究費補助金(基盤 A)の助成を受けています。

### 参考文献

1. K. Watanabe et al.: IEEE Trans. Appl. Super., **23** (2013) 4300304.
2. S. Awaji et al.: IEEE Trans. Appl. Super., **24** (2014) 4302005.
3. H. Oguro et al.: IEEE Trans. Appl. Super., **24** (2014) 8401004.
4. M. Sugimoto et al.: IEEE Trans. Appl. Super., **25** (2015) 6000605.

## 無冷媒 25 T 超伝導マグネット用 14T-LTS コイルの励磁試験

Performance test of a 14T-LTS coil for a 25 T cryogen-free superconducting magnet

小黒 英俊, 淡路 智, 渡辺 和雄(東北大); 花井 哲, 土橋 隆博, 井岡 茂(東芝)

OGURO Hidetoshi, AWAJI Satoshi, WATANABE Kazuo (Tohoku Univ.);

HANAI Satoshi, TSUCHIHASHI Takahiro, IOKA Shigeru (Toshiba)

E-mail: h-oguro@imr.tohoku.ac.jp

## 1. はじめに

我々のグループは、次世代強磁場施設建設に向け、新たな強磁場超伝導マグネットを開発している。この中で、2015年3月に25T無冷媒超伝導マグネット(25T-CSM)を完成させた[1]。このマグネットは、NbTi及びNb<sub>3</sub>Snラザフォードケーブルを使用した低温超伝導(LTS)コイルで14T、高温超伝導(HTS)コイルを用いて10.5Tを発生させることで、合計24.5Tを発生させる設計となっている。LTSコイルはGM-JT冷凍機2台で冷却し、4.3K程度まで冷却される設計となっている。

Nb<sub>3</sub>Snラザフォードケーブルに関しては、新しい高強度線材である、Nb rod法CuNb補強Nb<sub>3</sub>Sn素線を開発し、この高強度線材を用いてケーブルの作製を行った[2]。このケーブルを用いて実機を模擬した小型多層コイルを作製し、低温強磁場中での通電特性を調べ、良好な結果が得られることが分かっている。この結果から、25T-CSMの実機LTSコイルでも良好な結果が得られることが予想される。

本報告では、25T-CSMのLTSコイルの単独通電試験結果について述べる。

## 2. 25T-CSM用LTSコイル概要

LTSコイルは、NbTiとNb<sub>3</sub>Snともラザフォードケーブルを用いて作製した。どちらのケーブルも素線は16本とし、パッキングファクターは小さく、Nb<sub>3</sub>Snでは83.1%としている。

Nb<sub>3</sub>Snラザフォードケーブルには非常に大きな電磁力(設計値で251MPa)が加わるため、素線にCuNb補強Nb<sub>3</sub>Sn(CuNb/Nb<sub>3</sub>Sn)線材を使用している。CuNb/Nb<sub>3</sub>Sn線材は不可逆応力が300MPa以上なので、電磁力が大きく加わる運転条件でも使用できる。ラザフォードケーブルは670°C x 96hの熱処理を行った後に、0.5%の事前曲げ処理を行った。このケーブルを用いて、React & Wind法でNb<sub>3</sub>Snコイルの作製を行った。LTSコイルはエポキシ含浸を施してある。

LTSコイルは運転電流854Aで、300mmのコールドボアに14Tを発生させる設計となっている。冷却はGM-JT冷凍機2台で行い、その冷却能力は4.3Kにおいて8.4Wとなる。励磁中に温度を維持するために、大きな冷却能力を持たせている。

## 3. 実験結果

図1に励磁時の通電電流、磁場、温度、電圧の様子を示す。通電電流は、電源のシャント抵抗電圧より求め、磁場はホール素子を用いて測定した。図より、60分で定格である854Aに到達出来たことが分かる。このとき、温度は最も高いL2コイルで5K以下であり、安全に運転が出来ることが分かった。電圧は、測定間隔が5秒であったこともあり、スパイクなどのノイズは見えなかったが、数回の通電テストを行ったが、大きな問題は現れなかった。運転電流通電時の電磁力は最大で267MPaとなり、Nb<sub>3</sub>Snにとっては非常に大きな値であるが、CuNb/Nb<sub>3</sub>Snラザフォードケーブルを用いたため、この電磁力でも問題は現れなかった。磁場の値はホール素子を用いて測定しており、HTSコイルを外して励磁した際に、14.0Tの発生を確認した。

図1の結果は、数回の励磁テストの後の結果であるが、最初の励磁時にも、トレーニングによるクエンチが見られなかった。この原因は、ラザフォードケーブルの断面圧縮率(compaction rate)を小さくしたことで、素線が動きやすくなり、

エネルギーの小さい微小な動きやクラックが多く発生したためと考えられる。実際、最初の励磁試験時のコイル電圧には、多くのスパイクノイズが現れたが、2回目以降は大きく減少した。これに伴い、初回励磁のみ、比較的大きなコイル温度上昇が見られた。

以上より、CuNb/Nb<sub>3</sub>Snラザフォードケーブルを用いて、事前曲げ処理を利用したReact & Wind法で作製した14T-LTSコイルは、25T無冷媒超伝導マグネット用コイルとして、十分な能力を持つことが分かった。

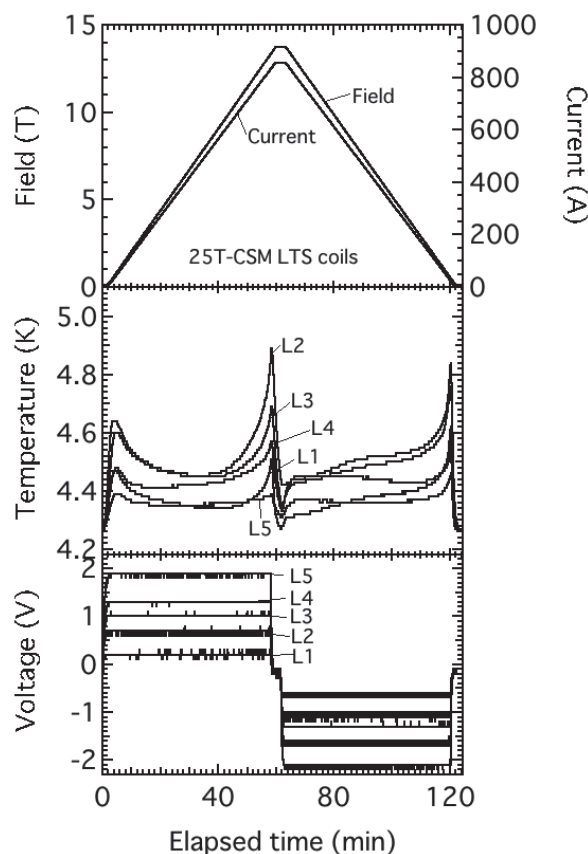


Fig. 1 The transport current, field, temperatures and voltages of the LTS magnet at the performance test for a 1 h ramp mode.

## 謝辞

本研究は東北大学金属材料研究所附属強磁場超伝導材料研究センターで行われました。また、本研究の一部は科学研究費補助金(基盤A)による補助を受けました。

## 参考文献

1. S. Awaji et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 24, (2014) 4302005
2. M. Sugimoto et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 25, (2015) 6000605



# 無冷媒 25 T 超伝導マグネット用 Y 系 HTS コイルの試作開発と励磁試験

## Fabrication and testing of HTS coil wound with REBCO coated conductors for a cryogen-free 25 T superconducting magnet

宮崎 寛史, 岩井 貞憲, 戸坂 泰造, 田崎 賢司, 花井 哲, 瀧上 浩幸, 井岡 茂(東芝);  
渡辺 和雄, 淡路 智, 小黒 英俊, 土屋 雄司(東北大);大保 雅哉, 飯島 康裕(フジクラ)

MIYAZAKI Hiroshi, IWAI Sadanori, TOSAKA Taizo, TASAKI Kenji, HANAI Satoshi,  
TAKIGAMI Hiroyuki, IOKA Shigeru (TOSHIBA); WATANABE Kazuo, AWAJI Satoshi,  
OGURO Hidetoshi, TSUCHIYA Yuji (Tohoku Univ.); DAIBO Masanori, IJIMA Yasuhiro (Fujikura)  
E-mail: hiroshi17.miyazaki@toshiba.co.jp

### 1. はじめに

内挿の Y 系 HTS コイルは 138 A 通電時に 11 T の磁場を発生し、外挿の LTS コイルが発生する 14 T と組み合わせることで  $\phi$  52 mm の室温空間に 25 T の磁場を発生させる。Table1 に示すように Y 系 HTS コイルは 56 枚のシングルパンケーキコイルにて構成されており、1 段および 2 段 GM 冷凍機を用いた He ガス循環方式にて冷却される。25 T 発生時の最大フープ力は 387 MPa であり、電磁力に対する検証試験として、実機と同じ構造の 4 枚のパンケーキコイルを積層した 4 積層コイルを試作し、11 T のバックアップ磁場中にて通電試験を実施した結果について報告する。また、実機 Y 系 HTS コイルの単体試験結果も合わせて報告する。

Table1. Specifications of HTS insert coil

Conductor width	5 mm
Conductor thickness	0.13 mm
Inner diameter	102 mm
Outer diameter	263 mm
Height	336 mm
Number of pancakes	56
Total number of turns	24360
Operating current	138 A
Maximum hoop stress	387 MPa
Field contribution	11 T

### 2. 4 積層コイル試作・評価

実機と同じサイズのシングルパンケーキコイル 4 枚を積層したコイルを試作し、伝導冷却にて通電試験を実施した。各シングルパンケーキコイルには、厚さ 0.25 mm の高純度アルミ板をエポキシ樹脂で貼り付け、高純度アルミ板の端部を GM 冷凍機の 2 段冷却ステージに接続してコイルを冷却した。各シングルパンケーキコイルの最外周に電圧タップを取り付け、2 積層コイル(#1-#2, #3-#4)の両端電圧を測定した。11 T バックアップ磁場中にて最大 192 A 通電した際の  $V-I$  特性を Fig.1 に示す。192 A 通電時の最大フープ力は 391 MPa であり、実機で想定される 387 MPa 以上の電磁力でも通電可能なことを確認した。

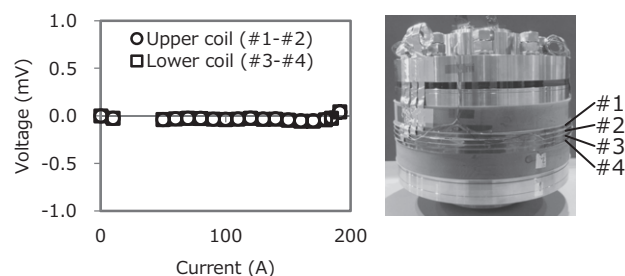


Fig.1  $V-I$  characteristics of four stacked pancake coils in an 11 T background magnetic field

### 3. Y 系 HTS コイル単体試験

Fig.2 に製作した Y 系 HTS コイルを示す。56 枚のシングルパンケーキコイルをステンレスの円筒に挿入し、電磁力や冷却時の熱収縮でずれないように軸方向に圧縮して固定した。また、各シングルパンケーキコイルには厚さ 0.25 mm の高純度アルミ板をエポキシ樹脂で接着した。コイル上下に設けた冷却ステージに高純度アルミ板を接着し、コイルを冷却した。また、コイル上、中、下に電圧タップを取りつけ、上下半分ずつ電圧を測定した。Y 系 HTS コイルをクライオスタットに組み込み、LTS コイルを通電しない状態にて単体試験を実施した。試験結果を Fig.3 に示す。中心磁場の計算値 10.5 T に相当する 131.3 A まで 1 時間で励磁し、その時の実測値は 9.9 T であった。その後、133 A まで電流を増加し、最終的に実測値 10.15 T を達成した。10.15 T 発生時にもコイル電圧に異常は見られず安定に通電可能であることを確認した。

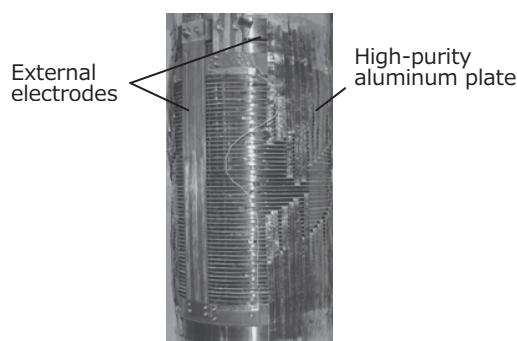


Fig.2 Photograph of HTS insert coil

### 4. まとめ

4 積層コイルにて実機で想定されるフープ力を通電可能であることを確認後、実機 HTS コイルを製作し、単体にて励磁試験を実施した。133 A 通電時において、最大 10.15 T の発生に成功した。

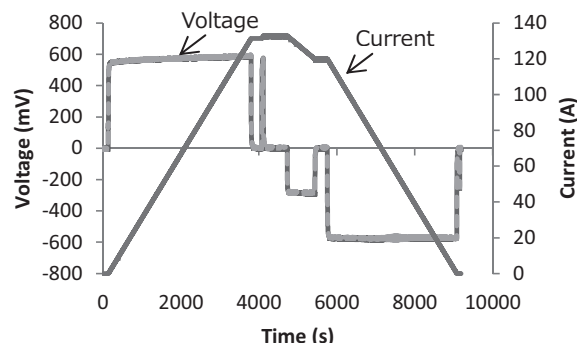


Fig.3 Temporal variations of  $V$  and  $I$  in the single operation

謝辞:本研究の一部は科学研究費補助金(基盤A、25246032)による補助を受けています。

## 無冷媒 25T 超伝導マグネットの励磁試験(組合せ試験)

## Performance test of 25T cryogen-free superconducting magnet (Combination test)

淡路 智, 小黑 英俊, 渡辺 和雄(東北大金研), 宮崎 寛史, 戸坂 泰造, 花井 哲, 井岡 茂(東芝)

AWAJI Satoshi, OGURO Hidetoshi, WATANABE Kazuo (Tohoku Univ.); MIYAZAKI Hiroshi, TOSAKA Taizo, HANAI Satoshi, IOKA Shigeru (Toshiba)

E-mail: awaji@imr.tohoku.ac.jp

## 1. はじめに

東北大に設置された 25 T 無冷媒超伝導マグネット(25 T-CSM)は, 14 T の金属系超伝導(LTS)コイルの内側に, 11 T の高温超伝導(HTS)コイルを組み合わせて 52 mm の室温ボアに 25 T の磁場を発生する [1]。HTS コイルには, フジクラ製銅メッキ  $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$  (RE123)テープを採用している。これまでに, LTS, RE123 コイルそれぞれ, 14 T と 10.5 T までの単独通電に成功した[2, 3]。この単独通電の結果を踏まえ, 本報告では, 組み合わせ通電のテスト結果について報告する。

## 2. 25T無冷媒超伝導マグネット

25T-CSM の定格電流は, LTS が 854 A で 14 T を, その内層で HTS が 144 A で 11.5 T を発生して, トータル 25.5 T とする設計である。保護回路は, コイルのバランス電圧でクエンチ検出を行い, 保護抵抗によってエネルギーを回収する設計となっている。特に HTS コイルでは hot spot による焼損のリスクがあるので, 外コイルのクエンチが発生しても, HTS コイルに誘起される電流が, 20 K の臨界電流を超えない設計となっている。マグネットは, 2015 年 3 月に東北大学金研強磁場センター別館に設置された (Fig. 1)。写真右手前がマグネットであり, 奥の部屋にコンプレッサー, 電源などの制御機器が設置され, ベランダ部分が実験スペースである。マグネットテスト終了後には, マグネット周りに実験用架台を設置する予定となっている。

## 3. RE123コイルとの組み合わせ試験結果

Fig. 2 に組み合わせ通電結果を示す。最初 LTS コイルを 14 T まで励磁した後, HTS コイルの励磁を開始した。HTS の通電電流は, 段階的に上昇させた。LTS コイル励磁時には, LTS, HTS コイル共に温度上昇があるが, LTS 励磁終了後には, 温度が下降し, HTS 通電時でも LTS はほぼ 4.3 K で安定した。一方で, HTS の温度は励磁によって徐々に上昇し, 運転電流 124 A で約 6.6 K に達した。HTS コイルの上コイルと下コイルの差であるバランス電圧は, 電流掃引時に, 大きなスパイクノイズが発生したが, ホールド中には現れなかった。スパイクノイズの大きさは, 最大で 40 mV を超えることもあった。このスパイクノイズは, 一旦経験した磁場以下では喪失したことから, 電磁力によるエポキシのクラックなどによるものと考え



Fig.1 25T-CSM installed at the HFLSM annex

られる。ホールド中の電圧を見ると, 10 A 程度の比較的低い電流から微少な電圧が出始め, 電流と増加と共に徐々に増加している。通電電流が 124 A に達した時の発生電圧は, 約 5.5 mV となった。その後, 一旦電流を 115 A まで下げると電圧も減少し, 再度電流を上昇させ 124.8 A に達したときに, 電圧が急上昇し, クエンチに至った。実際には, HTS コイルのクエンチ検出器が動作し, HTS 及び LTS コイル共に電源が遮断して, 保護動作に入った。124 A 保持時の発生磁場は, 計算値で 23.9 T, 実測値で 23.5 T であり, クエンチ直前では計算値で 24.01 T となっている。

謝辞: 本研究の一部は科学研究費補助金(基盤A)の助成を受けています。

## 参考文献

1. S. Awaji *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. 24 (2014) 4302005(4pp).
2. H. Oguro *et al.*, Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 92 (2015) to be published as 3A-p03.
3. H. Miyazaki *et al.*, Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 92 (2015) to be published as 3A-p04.

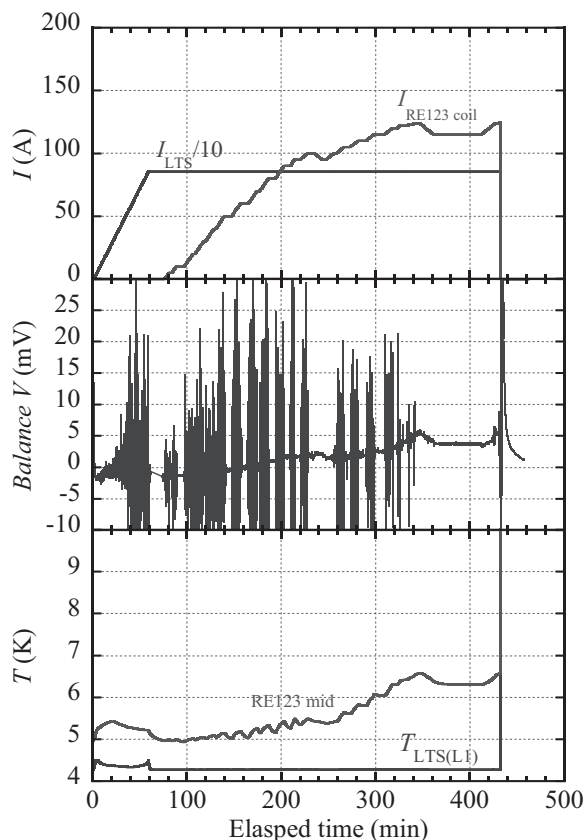


Fig. 2 Combination test results of the 25T-CSM

## 無冷媒 25T 超伝導マグネット用 11T-Bi 系 HTS コイルの製作

## Manufacturing of an 11T BSCCO Insert coil for a cryogen-free 25T superconducting magnet

花井 哲, 土橋 隆博, 井岡 茂(東芝); 渡辺 和雄, 淡路 智, 小黒 英俊(東北大)

HANAI Satoshi, TSUCHIHASHI Takahiro, IOKA Shigeru (Toshiba);

WATANABE Kazuo, AWAJI Satoshi, OGURO Hidetoshi (Tohoku Univ.)

E-mail: satoshi.hanai@toshiba.co.jp

## 1. はじめに

東北大学金属材料研究所の無冷媒 25T 超伝導マグネット(以下 25T-CSM)は、高温超伝導インサートコイルと低温超伝導コイルを組み合わせたことにより、25T の定常高磁界を発生させるためのコイルである。昨年の秋の学会において、新開発の高強度 BSCCO 線材を用いることで 25T-CSM 用インサートコイルの設計が可能であることを示したが[1]、25T-CSM 用として ReBCO 線材を用いた高温超伝導インサートコイルの他に、高強度 BSCCO 線材を用いたインサートコイルの製作も行った。ここでは、高強度 BSCCO 線材を用いて製作した 25T-CSM 用 11T-Bi 系 HTS コイルについて報告する。

## 2. 超伝導導体

11T-Bi 系 HTS コイルに使用した高強度 BSCCO 線材 (DI-BSCCO<sup>(R)</sup> Type HT-NX 導体)の特性(仕様値と実績値)を表1に示す。Table 1に示すように導体厚さが設計値 0.32mm に対し、多少薄めの仕上がりになった(平均厚さ 0.30mm)以外は、ほぼ仕様どおりの導体が得られた。

Table 1 Conductor parameters and performance of the 11T BSCCO insert coil for 25T-CSM

	Specifications	Measurements
Conductor width (mm)	4.5±0.3	4.4-4.6
Conductor thickness (mm)	0.32±0.04	0.28-0.34
Critical current (A@77K)	>185	185-200
n-value	—	16-18
Degradation ratio of critical current after 400MPa tension impressed at 77K	>95 %	>98.5 %

## 3. 11T-Bi 系 HTS コイル

11T-Bi 系 HTS コイルを構成する 38 ダブルパンケーキコイルの液体窒素通電試験結果(I-V 特性)を Fig. 1に示す。

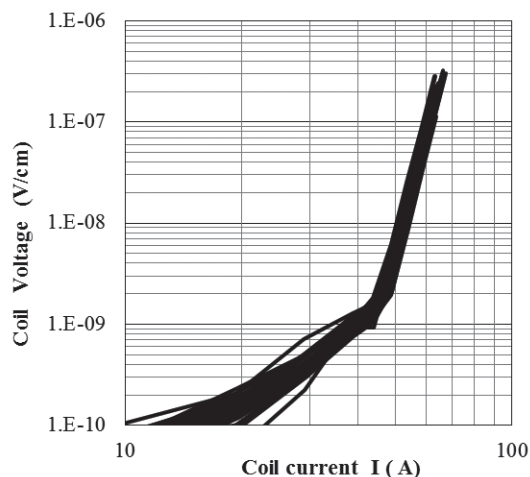


Fig. 1 I-V property of BSCCO double pancake coils of an 11T BSCCO insert coil for 25T-CSM

Fig.1に示すようにダブルパンケーキコイル単体での臨界電流約70A、n値約15と特性の揃ったダブルパンケーキコイルが得られた。各ダブルパンケーキは、外径部で接続するため、外径基準で巻線を行った。一方、先に示したように超伝導導体が薄めの仕上がりとなったため、巻数が平均で約10%多くなった。このダブルパンケーキを38枚積層して構成した11T-Bi系HTSコイルのパラメータをTable 2に示す。また、コイルの外観写真をFig.2に示す。

Table 2 Coil parameters of the 11T BSCCO insert coil

11T BSCCO insert coil	
Superconductor	DI-BSCCO Type HT-NX
Conductor size (mm)	4.5×0.30
Inner radius (mm)	48.0
Outer radius (mm)	139.3
Coil height (mm)	390.3
Number of turns	19525
Ampere turn (MA)	3.96
Operating current (A)	203
Current density of conductor (MA/m <sup>2</sup> )	150
Current density of coil (MA/m <sup>2</sup> )	112
Magnetic field contribution (T)	11.5
Maximum field (T)	25.6
Operating temperature (K)	10
Load factor (%)	89
Hoop stress (MPa)	323
Compressive stress (MPa)	32

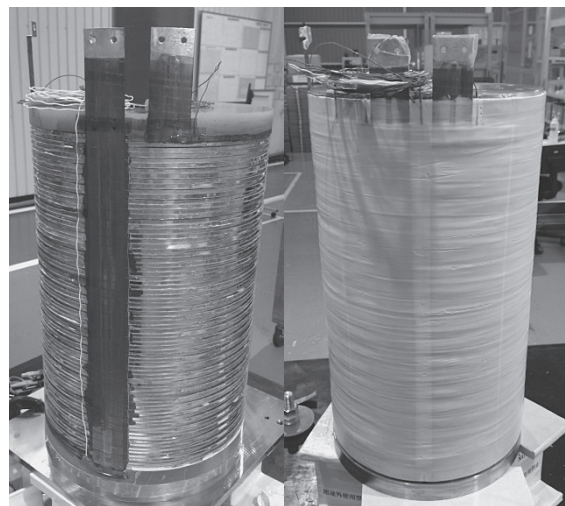


Fig. 2 Photograph of the 11T BSCCO insert coil (Left: just after stack, Right: after insulation)

## 4. まとめ

以上示したように、25T-CSM 用 11T-Bi 系 HTS コイルの製作が完了した。本コイルを用いた低温超伝導コイルとの組合せ通電試験は 11 月に実施予定である。

## 参考文献

1. S. Hanai, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 90(2014) p.107



# REBCO コイルにおけるクエンチ保護特性の検討

## Conditions for Quench Protection of REBCO coils

中山 大樹, 塚本 修巳, 有山 隆紘, 高尾 智明(上智大学); 高木 智洋(古河電工)  
 NAKAYAMA Daiki, TSUKAMOTO Osami, ARIYAMA Takahiro, TAKAO Tomoaki (Sophia University);  
 TAKAGI Tomohiro (Furukawa Electric Co., Ltd)  
 E-mail: daiki.3518@sophia.ac.jp

### 1. はじめに

SMES や回転機の大型超伝導機器に応用される HTS コイルにおいては電氣的に絶縁された HTS 線材が用いられる。電流密度の高い HTS コイルにおいて、クエンチ保護が正常に作動しない場合は簡単にコイルが劣化する危険性がある。本研究では小型 REBCO コイルを作製し、線材のホットスポット温度とクエンチ検出電圧、通電電流、クエンチ後の通電電流減衰時定数との関係を調べた。コイル線材は銅層の厚み 40  $\mu\text{m}$ 、100  $\mu\text{m}$  の 2 種類を用い、銅層の厚さのクエンチ保護特性への影響を検討した。

### 2. 実験方法

実験では内径 12 cm、35 ターンのコイルを用いた。使用した線材は幅 4 mm、厚さ 95  $\mu\text{m}$  および 155  $\mu\text{m}$  である。層間に挿入したヒータにより線材の一部を加熱しクエンチを起こし、クエンチ検出後、コイル通電電流を時定数  $\tau$  で減衰させ、その間のヒータ加熱部の線材の温度の変化を熱電対で検出し記録した。コイルの運転温度は 50 K である。クエンチ検出は共巻法によりコイルに発生する電圧から誘導電圧をキャンセルした抵抗成分電圧  $V_q$  をモニターし、その値が閾値  $V_{qs}$  を超えることを検出することにより行った。電流減衰過程での線材の到達温度の最大値 (ヒータ加熱部の線材の温度:  $T_{HS}$ ) とクエンチ検出時の線材の電流  $I_0$ 、時定数  $\tau$  およびクエンチ検出電圧  $V_{qs}$  の関係について調査した。

### 3. 実験結果、考察

図 1 にコイル線材の銅層の厚み 40  $\mu\text{m}$  の場合について、クエンチの閾値  $V_{qs}$  と  $T_{HS}$  との関係を示す。このとき  $I_0=100$  A、 $\tau=2, 4, 6$  s とした。図 1 より  $\tau=6$  s の場合、 $V_{qs}=0.5$  mV と高感度のクエンチ検出を行ったとしても  $T_{HS}$  は 530 K を超えてコイルは損傷を受け、再度の通電に対して低い電流値でヒータ加熱をしなくてもクエンチが確認された。図 2 はコイルがクエンチによる損傷を受けた時の、コイル電圧  $V_c$ 、ヒータ加熱部線材温度  $T_h$ 、コイル電流  $I_0$  の時間変化の一例である。図 3 に銅層の厚さが 100  $\mu\text{m}$  の線材でコイルを巻いた場合における  $T_{HS}$  と  $\tau$  の関係を  $I_0=100$  A-160 A について示す。図 3 より  $I_0=160$  A、 $\tau=5$  s の場合において、 $V_{qs}=10$  mV でも焼損が起きないことが予想される。これは銅層の厚さが 40  $\mu\text{m}$  の場合に比べクエンチに対するコイルの耐性が大きく向上していることを示している。

上記の実験結果に基づき線材の銅層の厚みが 40  $\mu\text{m}$  と 100  $\mu\text{m}$  の場合において、コイルがクエンチによる損傷を受けない条件の比較をしたものを表 1 に示す。コイルの線材の銅層の厚みが 40  $\mu\text{m}$  において、 $I_0=100$  A、 $\tau=6$  s とした場合、 $V_{qs}=0.5$  mV と高感度なクエンチ検出をしても、コイルは損傷を受け、損傷を防ぐためには  $V_{qs}=0.3$  mV としなければならない。一方、銅層の厚さが 100  $\mu\text{m}$  において、 $I_0=160$  A、 $\tau=5$  s とした場合、 $V_{qs}=10$  mV でもコイルは損傷を受けないと推定される。銅層の厚みが 40  $\mu\text{m}$  の場合と 100  $\mu\text{m}$  の場合では、線材のオーバーオール臨界電流密度は 40  $\mu\text{m}$  の場合の方が高い、しかしコイルの巻線密度の観点からすると絶縁層の厚みを考慮する必要があり、絶縁層(25  $\mu\text{m} \times 2$ )を含めた場合、クエンチ保

護の観点から銅層を 100  $\mu\text{m}$  に増やしたほうが通電電流密度は向上する事が明らかとなった。

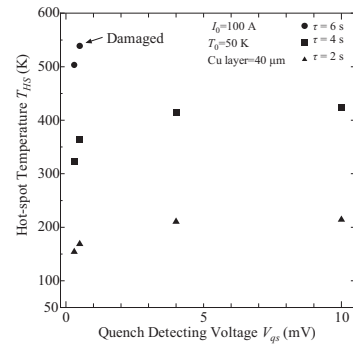


Fig. 1. Hot-spot temperature  $T_{HS}$  vs. quench detection threshold  $V_{qs}$

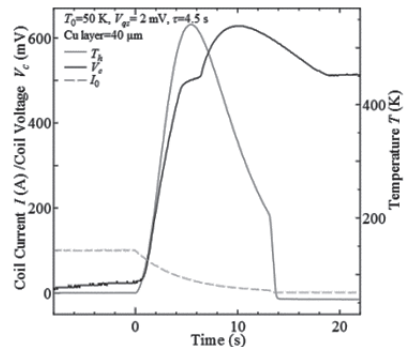


Fig. 2. Example of quench event of the test coil wound of YBCO tape with 40  $\mu\text{m}$  Cu layer when coil was damaged

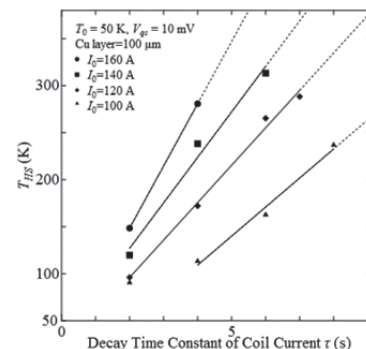


Fig. 3.  $T_{HS}$  vs.  $\tau$  for  $V_{qs}=10$  mV and  $I_0=100$  A-160 A

Table 1. Comparison of Cu layers 40  $\mu\text{m}$  and 100  $\mu\text{m}$

コイル銅層の厚み	40 $\mu\text{m}$	100 $\mu\text{m}$
通電電流 $I_0$	100 A	160 A
電流減衰時定数 $\tau$	6 s	5 s
クエンチ損傷を受けない $V_{qs}$ の値	0.3 mV	10 mV
線材オーバーオール通電電流密度		
線材のみ (基板 50 $\mu\text{m}$ )	263 A/mm <sup>2</sup>	258 A/mm <sup>2</sup>
絶縁層 (25 $\mu\text{m} \times 2$ )を含む	170 A/mm <sup>2</sup>	193 A/mm <sup>2</sup>

# NMR 開発に向けた RE123 スプリット線材・コイルの応力耐性に関する基礎評価

## Element technologies for NMR/MRI development using HTS magnet (1)

### An idea of inner split technology for REBCO multi-core coated conductor and its demonstration

金 新哲(理研); 小黒 英俊(東北大); 松田 徹郎(東工大)  
 Xinzhe Jin (RIKEN); Hidetoshi Oguro (Tohoku Univ.); Tetsuro Matsuda  
 E-mail: xinzhe.jin@riken.jp

#### 1. はじめに

超高磁場 NMR/MRI の実現に向けて、我々は多芯テープ構造を持つ RE123 スプリット線材(スプリッティング線材とも呼ぶ)の開発を進めている。これまでの実験評価では、RE123 スプリット線材の製造と性能に調べてきた。初歩的な研究による結果では、線材の臨界電流と引張強度及び反磁性(磁化測定)の測定結果から、従来の機械式スクライブ線材より大きな改善が得られているが、NMR・MRI マグネットへの応用にはさらにコイルにおける評価が必要である。特に、機械的な性能の評価において、エポキシ含浸の影響およびフープ応力の試験などが重要である。本研究では、RE123 スプリット線材の印加磁場中での臨界電流測定と、コイルにおけるエポキシ含浸、およびフープ応力試験などを行ったので、その結果を報告する予定である。

#### 2. RE123 スプリット線材とコイルの製作

RE123 スプリット線材は市販されている RE123 単芯テープ線材をローラーカッターでV字曲げにして、線材内部にスプリット(内部スプリット)を形成させることで簡易かつ効率よく加工している。このような製造法は、超伝導層が脆性を持つセラミックス材質であることから採用された技術である。今回製作した線材は、芯数が2本(線材の実験)と6本(コイルの実験、長さ6m)である。加工時のスプリット1本の加工速度は800m/時間である。元の線材は、SuperPower製の幅4mmのRE123テープ線材を使用した。

印加磁場中での臨界電流測定用の線材は、全長40mmの間に10mm間隔の電圧タップを半田付けして実験を行った。エポキシ含浸用のコイルは、内径30mmでそれぞれ26ターンのダブルパンチキ形状(全ターン数は52ターン)にし、絶縁層は薄型カプトンテープを使用した。なお、エポキシ溶液に含浸後は30分間真空引きし、それから常温常圧で硬化させた。Fig. 1にエポキシ含浸後のコイルを示す。元の線材より作製したコイルと比べ、スプリット線材により作製したコイルは径方向のボリュームの増加は見られていなく、ほぼ同じサイズであった。フープ応力試験用のコイルはFig. 2に示したように、外径40mmのサンプルホルダーに160mm長さの線材(ターン数:1)を巻き、電圧タップ間隔を40mmにした。

#### 3. 実験内容

元の線材と芯数が2本のスプリット線材は、温度77Kで印加磁場5TまでF-V測定を行った。印加磁場の方向は線材のテープ面に垂直方向である。エポキシ含浸コイルは、温度77Kで印加磁場なしでF-V測定を行い、 $1\mu\text{V}/\text{cm}$ を臨界電流の基準(電圧タップ間の距離:5.6m)とした。フープ応力試験では、線材の両端をサンプルホルダーに半田付けで固定し、4.2Kまで冷却した後コイルの軸方向に磁場15Tを印加してF-V測定を行った。

#### 4. 測定結果

印加磁場中でのF-V特性の測定結果、スプリット線材は元の線材と同程度の振る舞いを示し、印加磁場による臨界電流の変化は線材の内部スプリットの有無にほぼ依存を示していなかった。Fig. 3にその一部の測定結果を示す。エポキシ含浸したスプリット線材のコイルでは劣化のない特性が測定され、

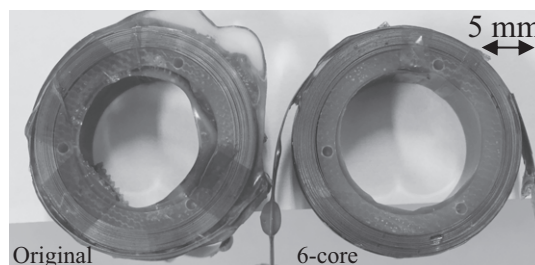


Fig. 1 Epoxy impregnated coils wound by original non-split wire and 6-core split wire.

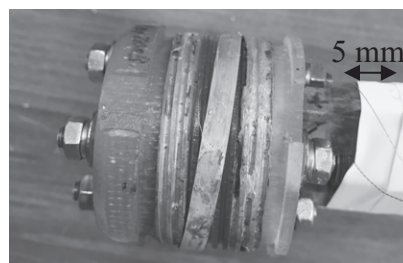


Fig. 2 Single-turn coil wound by 6-core split wire for  $F$ - $V$  measurement under hoop stress.

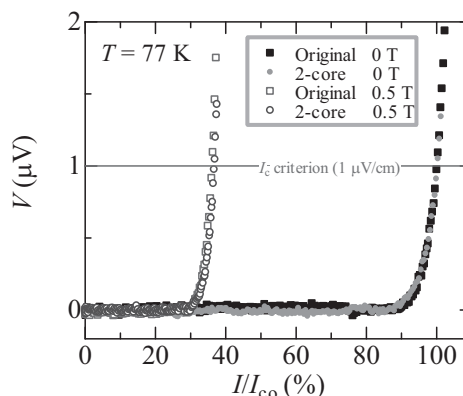


Fig. 3  $F$ - $V$  measurements of wires at external field of 0 and 0.5 T.

今後の大型コイルへの技術展開を期待している。フープ応力試験では、コイルに電流500A付近まで通電できた。この時、Wilson式から算出したフープ応力は約400MPaであり、それにコイルの曲げ(半径20mm)から生じるひずみに相当する引張応力200MPaを加えると、全体の外部引張応力(直線の線材に印加される引張応力)は600MPa程度になる。この結果により、約500MPa以上の線材引張の耐性が要求される高磁場での実用が有望である。

#### 5. 今後の予定

RE123 スプリット線材の10芯への試みと長尺化およびコイル評価を考えている。

# 負荷変動中に生じた高温超伝導変圧器巻線の局所異常の診断方法

## The Method to Diagnose Local Abnormalities Generated in Windings of High Temperature Superconducting Transformer During Load Changing

酒元 啓佑, 久保 俊貴 川越 明史 (鹿児島大学)

SAKEMOTO Keisuke, KUBO Toshiki KAWAGOE Akifumi (Kagoshima University)

E-mail: k0792339@kadai.jp

### 1. はじめに

実用段階の超伝導変圧器は、巻線状態を常に監視しておくことが必要である。そこで我々は、超伝導変圧器の新しい非接触型運転モニタリングシステムを提案している[1]。

本システムでは、ポインティングベクトル法を応用した異常測定法[2]を用いている。これまでに、巻線の局所的な温度上昇を、負荷変動中でも検出できることを実証している。しかしながら、測定結果から巻線の異常の程度を診断するまでにはいたっていない。その理由は、巻線の交流損失に起因する信号を測定していることから、測定信号を決める因子が、温度と負荷の二つになるためである。そこで、測定信号を負荷電流で規格化することによって、負荷変動に伴う測定信号の変化を抑える方法を考案したので、その結果について報告する。

### 2. 本監視システム方法及び規格化方法

我々の提案している非接触型運転モニタリングシステムでは、1対のピックアップコイルを用いる。それぞれのピックアップコイルで局所的な電界と磁界を測定し、それらの外積からポインティングベクトルを求め、その有効電力成分(エネルギーフロー)を観測する。

変圧器巻線の交流損失が負荷電流の累乗に比例すれば、負荷電流の累乗でエネルギーフローを規格化することによって、負荷変動によるエネルギーフローの変化を抑えることができる。すなわち、測定信号を温度のみが変数の関数で表せる。その結果、負荷変動中にピックアップコイル付近で異常が発生した場合に、異常を検出できる。

### 3. 実験

実験には、高さ約 120 mm、一次側内径 106 mm、二次側内径 70 mm、定格容量 800 VA の試験用超伝導変圧器を使用した。一次巻線と二次巻線には、77 K、自己磁界中での臨界電流が 115 A の高強度 Bi-2223 多芯テープ線材を使用した。超伝導変圧器及びピックアップコイル対の配置場所を Fig. 1 に示す。

まず、エネルギーフローの負荷電流依存性を調べるために、負荷を定格運転から定格の 75% に変化させ、エネルギーフローを測定した。その結果、今回使用した変圧器では、エネルギーフローが負荷電流の 1.98 乗に比例することがわかった。次に、異常検出試験を行った。負荷の変化は同様にし、負荷変動を継続しながら、室温の窒素ガスを巻線部に噴射することによって、巻線に局所的な異常を発生させた。そしてその時のエネルギーフローを測定し、負荷電流の 1.98 乗で規格化した。なお、異常発生箇所の巻線温度も測定している。

実験結果を Fig. 2(a), (b) に示す。Fig. 2(a) と (b) は、それぞれ、エネルギーフローの測定結果と異常発生箇所の温度を示す。Fig. 2(a) の白抜きと黒塗りのプロットは、それぞれ、エネルギーフローと規格化後のエネルギーフローである。図中の灰色領域は窒素ガスの噴射した時間帯である。測定されたエネルギーフローは負荷の変動に伴って変化しているのに対し、規格化したエネルギーフローは、正常時に変化しておらず、また異常が発生した 30 秒付近からは大きく変化している。さらに、窒素ガスの噴射を止めた 62 秒付近以降は、正常な状態

に復帰している。この変化は、巻線温度の変化とよく一致している。

### 4. まとめ

負荷変動中の高温超伝導変圧器の一次巻線端部に局所的な異常を発生させ、本監視システムにより、異常検出試験を行った。その結果、負荷変動中に局所的な異常を発生させた場合でも、提案法により負荷変動に伴う信号の変化をキャンセルできることを示した。以上のことから、提案法が変圧器の異常診断法として有効であることを示した。

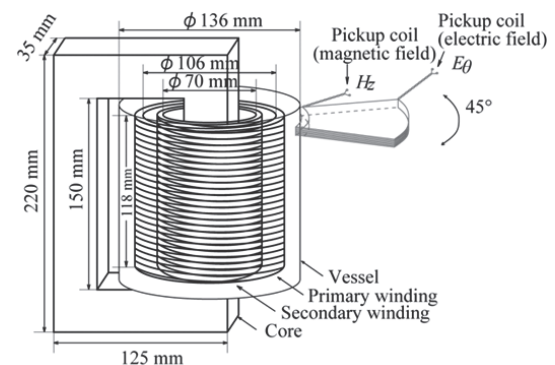


Fig. 1 Experimental set up

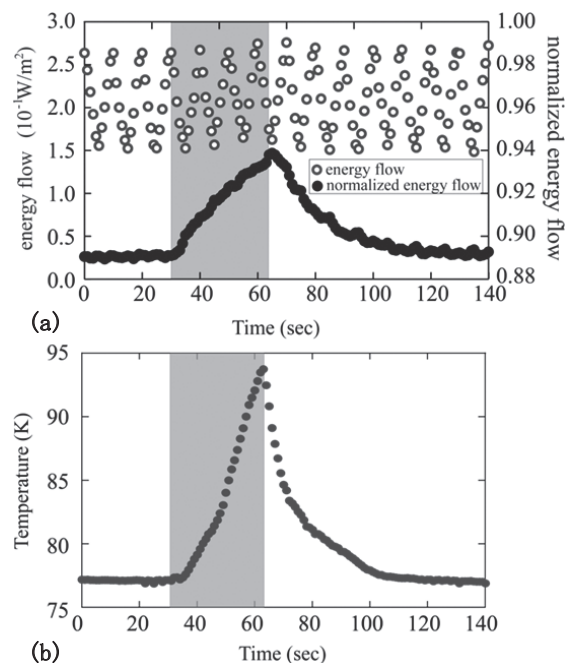


Fig. 2 Experimental results, (a) Measured energy flow and normalized energy flow, (b) Temperature

### 参考文献

1. H. Hiwatashi, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 86 (2012) p. 132.
2. A. Kawagoe, et al.: TEION KOGAKU (J. Cryo. Super. Soc. Jpn.), 47 (2012) p. 268.



## DI-BSCCO コイルのクエンチ保護(5)

### Quench protection of DI-BSCCO coil (5)

山口 貴寛, 上野 栄作, 新里 剛, 加藤 武志, 林 和彦(住友電工)

YAMAGUCHI Takahiro, UENO Eisaku, SHINZATO Tsuyoshi, KATO Takeshi, HAYASHI Kazuhiko (Sumitomo Electric Industries)

E-mail: yamaguchi-takahiro1@sei.co.jp

#### 1. はじめに

高温超電導線は常電導伝搬速度が $\sim$ cm/s と非常に遅いため、ホットスポットが発生し劣化することが懸念されている。その保護のためには、異常を検知した際、通電電流を速やかに下げることが必要であり、電流減衰時定数とクエンチ検出電圧の最適化が重要である。我々は以前、発生磁界を同等とした小コイルと大コイルで通電電流を 200A とし、電流減衰時定数とクエンチ検出電圧を変化させ、クエンチ保護可能な条件を調査した。その結果、クエンチ保護可能な条件はコイルの大きさに依らないことを示した(2014 秋 3A-a03)。次に、コイルの冷却効果を上げるために、磁性フランジを用い通電電流を 200A、250A とした試験を実施した。その結果、電流減衰時定数が 20s ではその効果が認められた(2015 春 3A-a02)。本発表では、通電電流を 300A としたときの結果を報告する。

#### 2. 実験に使用した小コイルの諸元

Fig.1 に試験に用いたコイルの概観、Table 1 にコイルの諸元を示す。コイルは DI-BSCCO 線材(Type Hi)を用いて作製されており、円形のダブルパンケーキコイル(エポキシ含浸済み)4個から構成されている。各コイル間、コイル-フランジ間には冷却用の銅板が挟みこまれている。冷却方法は伝導冷却とし、冷凍機の 2nd ステージから冷却パスを伸ばし、コイル上下と接続することにより、コイル上下方向から冷却する構造とした。

#### 3. 実験方法

通電電流は 300 A、クエンチ検出にはバランス回路を用い、クエンチ検出時間を 0.1s に固定した。クエンチはコイル温度を徐々に上昇させることで発生させた。ただし、保護抵抗による電流減衰ではなく、電流源を波形発生器で外部制御し、強制的に指数関数で電流減衰させる方法とした。そのときの電流減衰時定数とクエンチ検出電圧を変化させることにより、コイルの劣化の有無を調査した。

#### 4. 実験結果

Fig.2 は通電電流 200A、250A、300A のときの、電流減衰時定数とクエンチ検出電圧の関係まとめたものである。各曲線は、劣化が生じたときの条件を結んでいる。Fig.3 は電流減衰時定数と電流遮断時の発熱の関係を示したものである。300A 通電に着目すると、電流減衰時定数 20s 以下であれば、クエンチ検出電圧を 0.03V(発熱約 30W)以下にすればクエンチ保護可能なことがわかった。詳細は講演当日に報告する。

#### 5. まとめ

DI-BSCCO コイルはバランス回路でクエンチ検出可能であることを確認した。300A 通電を行ったときのクエンチ保護可能な電流減衰時定数とクエンチ検出電圧との関係を示した。30W 程度の発熱が生じて、熱暴走せず非常に安定的であった。

#### 6. 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)」の支援を受けて進めたものである。

Table 1 Specifications of the DI-BSCCO coil

Current	300A
Coil shape	Circular double pancake
Coil ID	89mm
Coil OD	214mm
Number of stacked coil	4
Total turns	2000turns(500turns × 4)
Maximum perpendicular field	4.1T
Maximum parallel field	6.8T

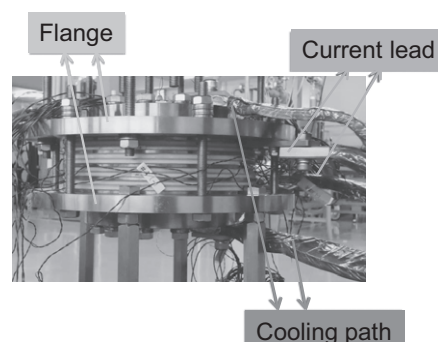


Fig.1 DI-BSCCO coil

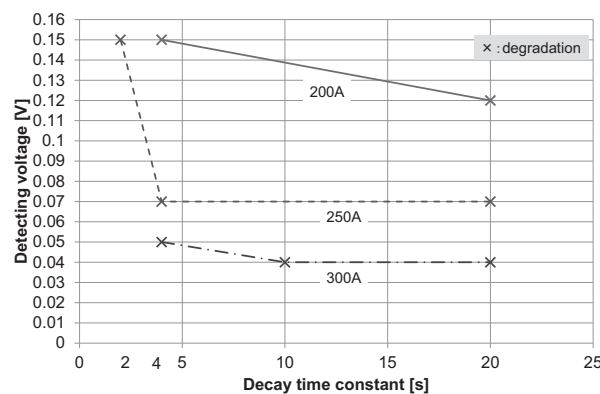


Fig.2 Decay time constant vs Detecting voltage

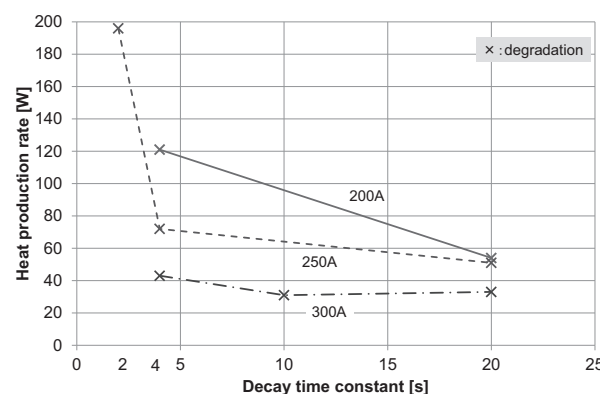


Fig.3 Decay time constant vs Heat production rate

# コイル保護方法としての HTS コイルの永久電流モード運転(1)

## PC mode operation as passive protection method for HTS coil (1)

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

TOSAKA Taizo, IWAI Sadanori, MIYAZAKI Hiroshi, OTANI Yasumi, TASAKI Kenji,

NOMURA Shunji, ISHII Yusuke (TOSHIBA)

E-mail: taizo.tosaka@toshiba.co.jp

### 1. はじめに

コイル保護技術は、いわゆるマグネットテクノロジーのキーとなる技術であり、超電導コイルを実用化する上での生命線であるともいえる。しかしながら、高温超電導 (HTS) コイルの場合、10 K 程度以上の温度で直流運転していれば、安定性が高いため不測のクエンチ (熱暴走) は発生しないが、ひとたび熱暴走が発生すると常電導伝播の速度が極端に遅いため、焼損は免れない。そこで、熱暴走の条件を把握し、コイル温度を監視することで熱暴走を未然に防止するコイル保護思想が提案されてきた[1]。ただし、機械的なダメージなどで高温超電導線材の特性が劣化していないこと、信頼性が高い冷却構造でコイル温度を的確に把握できることが必要となる。一方、近年では、隣接ターン間に電流を迂回させる、いわゆる無絶縁コイルの研究が盛んになっている。この方法により、臨界電流を越えて通電しても焼損しないことが示されているが、隣接ターン間の抵抗が小さすぎると励磁時の磁場遅れやコイル内部での発熱が問題となり、コイル保護と両立させることが必要となっている。我々は、これら2つのコイル保護思想とは別の視点として、永久電流モード運転をベースとしたコイル保護方法について研究を進めている。本発表では、その基本的な考え方について報告する。

### 2. 永久電流モード運転をベースとしたコイル保護思想

実用的な HTS 線材の超電導接続方法がないため、特殊な手段と組み合わせないと NMR や MRI で求められる 0.1 ppm/h 以下の磁場減衰率は実現できないが、100 ppm/h 程度であれば、半田等による抵抗接続でも実現することはできる。今、永久電流モード運転されている、すなわちコイル両端が短絡され、循環電流によって磁場を発生している状態の HTS コイルを考える。この状態で、例えば冷凍機が停止し、冷却性能が失われたとする。当然、コイル温度は上昇していくことになり、HTS 線材の臨界電流が低下にともなって、フラックスフロー抵抗が大きくなり、発熱も大きくなっていく。もし、コイルに流れる電流が電源で維持されていれば、発熱がコイル温度の上昇を加速させ、熱暴走に至ってしまうが、永久電流モードで運転されているならば、フラックスフロー抵抗の増大とともに循環電流の減衰が大きくなり、発熱が抑制されることになる。このメカニズムを Fig.1 に模式的に示す。このバランスを維持したまま電流が減衰させることができれば、受動的な方法で熱暴走させずに消磁することができることになる。

このメカニズムがありうることは、プラズマ実験装置 RT-1 の磁気浮上磁石において既に検証されている。この磁石は、プラズマ真空容器中で浮上させるドーナツ形状の磁石であり、永久電流モードで運転される。Bi-2223 線材で巻線された HTS コイルが内蔵され、定格電流は 116 A、自己インダクタンスは 3.3 H、蓄積エネルギーは 22 kJ である[2]。実験中の 8 時間は、磁石から通電用コネクタ、冷却用ガス配管、計測用コネクタが切り離され、コイル温度上昇し続けるが、熱容量で運転可能な範囲 (約 30K 以下) に維持される。実験後は、機械式の昇降機構でプラズマ真空容器下部のドックに戻り、計測用コネクタ、通電用コネクタが接続されて消磁され、その後冷却用ガス配管が接続されて再冷却される運用方法となっている。この運用方法で想定されるリスクとして、実験後に何等か

の原因で計測用コネクタや通電用コネクタが接続できず、HTS コイルの温度が上昇し続けた場合に、HTS コイルが焼損することが懸念されていた。そのため設計段階において、この現象を模擬する数値計算を実施した。その結果、約 40 時間かけてゆっくりと磁場が減衰し、HTS コイルが熱暴走することなく消磁できる可能性があることを確認された。ただし、HTS コイルにダメージを与えるリスクはゼロではないと考えて実験的な検証はおこなわなかった[2]。しかし、プラズマ実験の実運用が開始された約 3 年半後に昇降機に一時的な不具合が発生し、まさに想定していた計測コネクタ、通電用コネクタ、冷却用ガス配管の全てが接続できない事態が発生した。しかし、外部から測定した磁場により、ほぼ数値計算で予測していた磁場減衰が観測され、その後の実験において HTS コイルの性能上に有意な差は見られなかった[3]。これによって、永久電流モードによるコイル保護の思想が実現可能であることが実証された。

### 3. まとめ

HTS コイルの保護思想としての、永久電流モード運転について、その原理と実証例について述べた。この保護思想で HTS コイルを守れるかどうかは、フラックスフロー抵抗の発生分布や、コイル内部の熱拡散、コイル蓄積エネルギー等によって影響されると考えられる。今後、設計最適化等により、この保護思想の有用性の検討を進めていく。

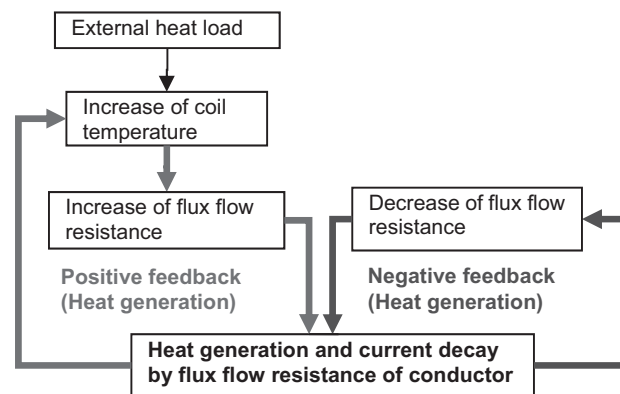


Fig. 1 Coil protection mechanism in an HTS coil being operated in persistent-current mode.

### 参考文献

- 戸坂泰造ら:「伝導冷却HTSコイルの安定性と保護」第86回 2012年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集 P131
- T. Tosaka et al, "Development of Persistent-Current Mode HTS Coil for the RT-1 Plasma Device," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.16, No.2 June 910 - 913 (2006)
- 齋藤晴彦, 吉田善章, 小川雄一, 森川惇二, 矢野善久, 水島龍徳, 水牧祥一, 戸坂泰造:「RT-1におけるBi-2223高温超伝導コイルの自然昇温による消磁」TEION KOGAKU (J. Cryo. Soc. Jpn.) Vol. 45 No.3 107-110 (2010)

## コイル保護方法としての HTS コイルの永久電流モード運転(2)

### PC mode operation as passive protection method for HTS coil (2)

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

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

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

#### 1. はじめに

HTS コイルの受動的な保護を目標に、永久電流モード運転をベースとしたコイル保護技術について研究開発を進めている。コイルのフラックスフロー抵抗を利用した電流減衰をコンセプトとしており、永久電流モードでの運転時に、コイル温度が上昇するなどして負荷率が上がると、フラックスフロー抵抗によりコイルの蓄積エネルギーが消費され、熱暴走することなく自動的に消磁できる可能性があることが分かった [1]。今回、フラックスフロー抵抗の発生を利用した別の方式の自動消磁回路を考案し、実際に熱暴走を回避できるか、REBCO コイルを試作して検証を行ったので報告する。

#### 2. 自動消磁回路の構成

回路構成を Fig. 1 に示す。REBCO コイルと並列に、有限の接続抵抗を持つ擬似的な永久電流スイッチとして、低抵抗体を接続している。低抵抗体を用いた場合、コイルの蓄積エネルギーの消費速度は速くなるが、フラックスフロー抵抗が発生しない定常運転時にも消磁してしまう。そのため、永久電流スイッチとコイルとの閉ループを形成する、いわゆる通常の永久電流モード運転ではなく、電源を常時接続し通電する方式を採用した。したがって、直流電源により供給される電流は、低抵抗体と超電導コイルの抵抗比によって分流し、コイルのフラックスフロー抵抗が生じない温度領域では、殆どの電流がコイルへ流れる。一方、コイル温度が上昇するなどして負荷率が上がり、フラックスフロー抵抗が発生すると、低抵抗体の抵抗値のオーダーに近づくにつれて分流比が徐々に変化し、低抵抗体へ電流を迂回させることができる。

#### 3. REBCO コイルの諸元と試作結果

考案した自動消磁回路の有効性を検証するため、REBCO 線材を用いた 2 積層パンケーキコイルを試験体とし、伝導冷却試験を行った。試作した試験用コイルの諸元を Table 1 に示す。2 つのパンケーキは、ほぼ同諸元で試作しており、積層層間には、伝導冷却用のアルミ伝熱板を挿入した。インダクタンスは、トータルで 29.2 mH である。また、液体窒素中で通電検査し、巻線後の超電導特性に劣化がないことを確認した。

#### 4. 伝導冷却下における自動消磁動作の検証試験結果

アルミ伝熱板を 2 段 GM 冷凍機の冷却ステージに接続し、伝導冷却試験を実施した。コイル温度の上昇による自動消磁動作を検証するため、コイル温度が 30 K の状態で 200 A まで通電後、冷凍機を停止し、フィードからの侵入熱、および 2 段冷却ステージに取り付けたヒーターの発熱で、コイル温度を Fig. 3(a) に示すように、約 70 K まで時間的に変化させた。なお、コイルに流れる電流値は、ホール素子で測定した中心磁場の値から算出している。REBCO コイルと低抵抗体のそれぞれに流れる電流値の時間変化を Fig. 3(b) に示す。初期状態で REBCO コイルに流れていた 190 A の電流は、約 40 分後から減衰が加速し、200 分後に約 34 % となる 65 A まで自動的に消磁することができた。

#### 5. まとめ

フラックスフロー抵抗の発生と低抵抗体への分流現象を利用した自動消磁回路を考案し、実際に熱暴走を回避できるか、

REBCO コイルを試作して伝導冷却下における自動消磁動作の検証試験を行った。結果、コイル温度の上昇時、REBCO コイルに流れる電流値を約 34 % まで自動的に消磁することに成功した。今後、電流密度や温度上昇速度を変化させた場合の試験を行うとともに、蓄積エネルギーの高い大型コイルでの検証を進めていく。

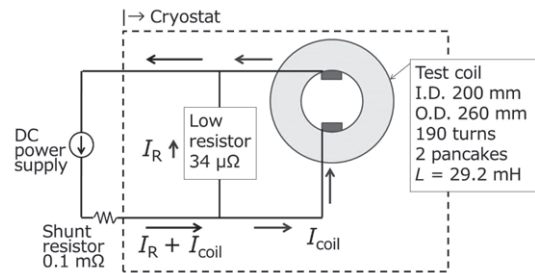


Fig. 1 Schematic diagram of test circuit

Table 1 Specification of two single pancake coils

Coil No.	#A	#B
Tape width (mm)	4	4
Tape thickness (mm)	0.1	0.1
Tape $I_c$ (77 K, s.f.) (A)	108~	104~
	121	119
Tape length (m)	138	138
Inner diameter (mm)	200	200
Outer diameter (mm)	259.5	259.7
Number of turns	190	190
Inductance (mH)	14.6	14.6
Coil $I_c$ (A) at 77 K	41	48
n-value at 77 K	27	23

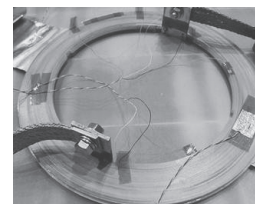


Fig. 2 Photograph of the test coil

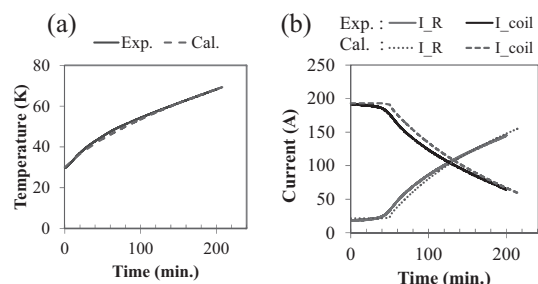


Fig. 3 Test results of passive protection circuit

#### 参考文献

1. T. Tosaka et al, "Development of Persistent-Current Mode HTS Coil for the RT-1 Plasma Device," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.16, No.2 June 910 - 913 (2006)



## 金属ケースで補強された含浸 REBCO コイル

### An impregnated REBCO coil reinforced by a stainless steel case

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

伝導冷却方式の超電導マグネットにおいて、2 段冷凍機を使用する場合、コイルへの熱侵入は、1 段ステージで冷却された輻射シールドで低減する方法が一般的である。REBCO 線材は、20 K~40 K でも高い臨界電流密度特性を持つため、単段冷凍機による冷却でも運転可能となる。そこで、これまでに単段冷凍機冷却方式の輻射シールドがないマグネットを開発してきた。本マグネットでは、冷凍機停止後の熱侵入が課題となるため、コイルケース内に熱抵抗の大きな断熱材を介してコイルを収納し、一定時間運転を継続可能な構成を提案している [1, 2]。REBCO コイルを適用するためには、冷凍機からコイル内部の線材まで伝熱パスを形成しておく必要があるが、樹脂含浸コイルの場合、冷却時の径方向熱応力が超電導特性の劣化要因となる。巻線部を分割することにより応力を低減する方法を提案しているが、形状保持性や機械強度の低下を招く恐れがある。本発表では、劣化回避と機械強度の両立を目指した新しいマグネット構成について述べるとともに、検証用の REBCO コイルの試作結果について報告する。

#### 2. マグネット構成

シングルパンケーキコイルを積層するタイプの REBCO コイルを想定したマグネットの概略構成図を Fig. 1 に示す。シングルパンケーキコイルの巻線内部は、径方向熱応力を低減するため、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、全てのターン間の接着力を弱めて分割する構成である。一方、シングルパンケーキコイルの層間は、エポキシ樹脂で接着し、積層コイル全体として機械強度を持たせる構成とした。積層コイルの上下面は、断熱材を介してステンレス製のコイルケースに固定し、また、さらなる補強のため、コイルケース内部の空隙をエポキシ樹脂で充填することで、構成部材を一体化させる。コイルケースと単段冷凍機はアルミ製の伝熱板で接続し、REBCO コイルは間接的に伝導冷却される。

#### 3. REBCO コイルの諸元と試作結果

本構成の有効性を検証するため、実際に 4 積層の REBCO コイルを試作し、伝導冷却試験を予定している。試作した 4 つのシングルパンケーキコイルの諸元を Table 1 に示す。形状保持性を検証する目的で、加速器用マグネットや、風力発電機、モータなどの回転機器への適用が可能な非円形のレーストラック形状とした。液体窒素中で通電検査した結果、 $10^{-9} \sim 10^{-7}$  V/cm の範囲で算出したコイル n 値は、26~30 と良好な超電導特性が得られていることを確認した。シングルパンケーキコイルの層間に絶縁したアルミ板を挿入してコイル間をエポキシで接着し、Fig. 2 に示す 4 積層コイルを試作した。各パンケーキの両端に電圧端子を取り付け、液体窒素中で通電試験した結果を Fig. 3 に示す。コイル n 値は 25~26 と積層後も低電界領域まで劣化の無い超電導特性を得ることができた。

#### 4. まとめ

劣化回避と機械強度の両立を目指し、巻線部を分割した含浸 REBCO コイルを、金属製のコイルケース内で断熱材とともに含浸し補強する構成を考案した。また、検証用の REBCO コイルを試作した結果、低電界領域まで良好な超電導特性を

有していることを確認した。引き続き、コイルケース内に収納して含浸したモデルマグネットを試作し、伝導冷却時の超電導特性を評価する予定である。

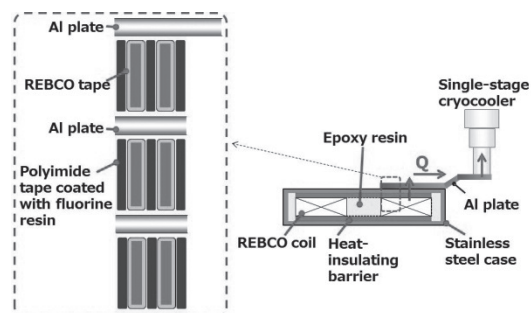


Fig. 1 Schematic of new concept magnet

Table 1 Specification of four single pancake racetrack coils

Coil No.	#1	#2	#3	#4
Tape width (mm)	4	4	4	4
Tape thickness (mm)	0.1	0.1	0.1	0.1
Tape $I_c$ (77 K, s.f.) (A)	101	98~116	102	101~134
Tape length (m)	244	244	244	244
Inner diameter (mm)	200	200	200	200
Outer diameter (mm)	258	258	257	258
Straight length (mm)	280	280	280	280
Number of turns	190	190	190	190
Coil $I_c$ (A) at 77 K	46	44	45	42
n-value at 77 K	27	30	28	26



Fig. 2 Four stacked racetrack coil

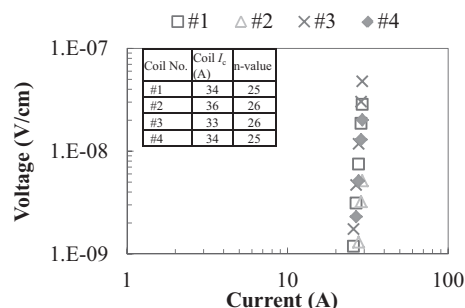


Fig. 3  $V-I$  characteristics of four stacked racetrack coils

#### 参考文献

- H. Miyazaki, et al., Abstracts of CSSJ Conference, Vol.86 (2012) p.126
- H. Miyazaki, et al., Abstracts of CSSJ Conference, Vol.86 (2012) p.127