

## SMES 用高温超電導トロイダルコイルの線材使用量低減に関する検討

## Study on reduction of HTS tape usage in HTS toroidal coil for SMES

最知 庸, 宮城 大輔, 津田 理(東北大)

SAICHI Yo, MIYAGI Daisuke, TSUDA Makoto (Tohoku University)

E-mail: saichi@ecei.tohoku.ac.jp

## 1. はじめに

高温超電導体を用いた SMES では、高温超電導体の  $J_c$ - $B$  特性の異方性により、電流量を確保するために、トロイダルコイルを用いて垂直磁場を低減することが有効とされている。しかし、トロイダルコイルの線材使用量は、ソレノイドコイルよりも多くなる傾向にある。このため、トロイダルコイルの線材使用量を抑えつつ、いかに垂直磁場を低減するかが重要となる。今回は、トロイダルコイルを構成する要素コイル数とコイルのアスペクト比に着目し、ソレノイドコイルよりも線材使用量が少なくなるトロイダルコイルの構成法について検討した。

## 2. 解析方法

トロイダルコイルでは、垂直磁場を減らすことにより、HTS 線材に流せる電流量を増やすことができる。すなわち、ソレノイドコイルよりも線材使用量を低減できる可能性がある。そこで、基準となるソレノイドコイルを軸方向に等分割したコイル(コイル内半径と外半径はソレノイドコイルと同じ)で構成されるトロイダルコイルを考え、コイルの分割数をパラメータとした場合の貯蔵エネルギーを計算した。本解析では、トロイダルコイルの線材使用量はソレノイドコイルと同じであるため、ソレノイドコイルよりも貯蔵エネルギーを大きくできれば、同じ貯蔵エネルギーの場合に、線材使用量の低減が可能になると考えられる。トロイダルコイルのアスペクト比  $a_t$  は、トロイダル主半径  $R_c$ 、要素コイル外半径  $r_c$  を用いると、以下の式で表される。

$$a_t = \frac{r_c}{R_c} \quad (1)$$

このアスペクト比が小さいほど、要素コイルを密に配置できるため、垂直磁場は低減される。しかし、目標とする貯蔵エネルギーを確保するためには要素コイルの巻数を増やす必要があるため、線材使用量は多くなる。そこで、アスペクト比をパラメータとしてトロイダルコイルを設計し、線材使用量低減に有効なアスペクト比について検討した。なお、コイルの最大磁場や線材への印加磁場は Biot-Savart の式を用いて計算した。また、貯蔵エネルギー  $E$  は、ベクトルポテンシャル  $A$  と通電電流密度  $J$  を用いると、以下の式で表すことができる。

$$E = \frac{1}{2} \int A \cdot J dV \quad (2)$$

## 3. コイル設計条件

コイルの最大磁場の評価点は、ソレノイドコイルではコイル内側表面で軸方向中心部、トロイダルコイルでは要素コイル内側表面でトロイダル中心に一番近い部分とした。コイル内半径・外半径と線材使用量を同じにした場合の貯蔵エネルギーの比較において場合の基準としたソレノイドコイルの諸元を Table.1 に示す。また、アスペクト比をパラメータとした場合のトロイダルコイル設計では、要素コイルの高さを一定、貯蔵エネルギーを 20MJ とし、トロイダルコイルの要素コイル間距離ができるだけ小さくなるようにした。なお、超電導線材の臨界電流密度は、パーコレーションモデル[1]を用いて計算した。

Table.1 Specifications of solenoid coils

Stored energy [MJ]	20
Maximum magnetic flux density [T]	5.0 / 10.0
Aspect ratio	3.0
Operating temperature [K]	20

## 4. 結果・考察

コイル内半径・外半径と線材使用量を基準とするソレノイドコイルと同じにした場合の、トロイダルコイルの要素コイル数と貯蔵エネルギーの関係を Fig.1 に示す。これより、ソレノイドコイルよりも少ない線材量でトロイダルコイルを構成できることがわかる。これは、要素コイル数が増えるとテープ線の最大垂直磁場が減少し、線材に流せる電流量が増えて、貯蔵エネルギーが増加するためである。また、ソレノイドコイルよりも線材量が少なくなる要素コイル数は、高磁場になる程少なくなった。これは、トロイダルコイルでは高磁場コイルでも垂直磁場を小さくできるため、高磁場化による臨界電流値の低下よりも貯蔵エネルギー増加の影響が大きくなるためである。以上の結果より、トロイダルコイルの構成方法を工夫することによって、ソレノイドコイルよりも線材使用量を低減できることが分かった。

トロイダルコイルの要素コイルのアスペクト比をパラメータとした場合の最大磁場と線材使用量の関係を Fig.2 に示す。アスペクト比が 0.6 程度のとき線材使用量が最少となった。アスペクト比 0.6 程度で線材使用量が最小となることについては貯蔵エネルギーに依存しないため、トロイダルコイル設計時の 1 つの指標になると考えられる。

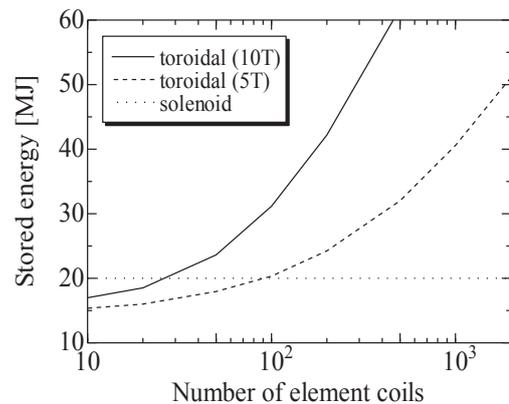


Fig.1 Stored energy in solenoid and toroidal coils

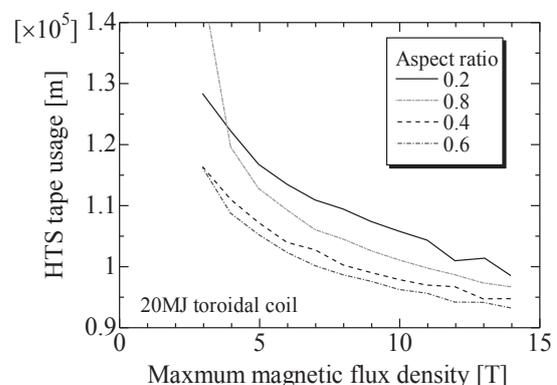


Fig.2 HTS tape usage as a function of aspect ratio

## 参考文献

[1] T. Kiss, et al.: J. Cryo. Soc. Jpn. vol.34, No.7 (1999) pp.322-331

# 超伝導電力機器と電力系統との過渡的相互作用の評価に向けた ハードウェア閉ループ試験システムの構築

## Hardware-in-the-loop Simulation System for the Investigation of Transient Interaction between Superconducting Electric Power Applications and Electric Power System

東川 甲平, 井上 昌睦, 木須 隆暢(九大); 富田 優(鉄道総研);

HIGASHIKAWA Kohei, INOUE Masayoshi, KISS Takano (Kyushu Univ.); TOMITA Masaru (Railway Technical Research Institute);

E-mail: kohei@super.ees.kyushu-u.ac.jp

### 1. はじめに

超伝導電力機器には、従来機器にはない様々な機能が期待されるが、実際に電力系統に導入されるためには、あらかじめ高い信頼性を実証しておくことが必要となる。そこで我々は、超伝導電力機器と電力系統との相互作用を解明することを目的とし、リアルタイム電力系統シミュレータ RTDS を用いたハードウェア閉ループ試験 (HILS) システム<sup>[1]</sup>の構築を目指している。これにより、プロトタイプレベルの超伝導機器が等価的に実規模の電力系統でどのような振る舞いをするかを、通常時のみならず事故や冷却などの状況を含めて明らかとすることが可能となり、系統導入時の信頼性を担保しながら超伝導機器の開発を行うことが可能となる。また、超伝導機器のシミュレーションモデルの構築にも大きく資すると期待される。本研究では、鉄道用超伝導き電ケーブル<sup>[2][3]</sup>への適用を目指した HILS システムの立ち上げ状況について報告する。

### 2. 方法

対象とするモデルの概略を Fig. 1 に示す。き電線に並列に超伝導ケーブルを導入することにより、回生失効の抑制や変電所間の準標準化、さらには変電所数の低減まで実現できることが期待されている<sup>[2]</sup>。本研究では、単純な例として 2 編成の列車が 2 つの変電所間を移動するモデルを採用した。一方、超伝導ケーブルの導入を模擬する HILS の構成を Fig. 2 に示す。電流容量 10 kA<sup>[3]</sup>で 1763 m 長の超伝導ケーブルを臨界電流 180 A で評価部 80 mm 長の Bi-2223 線材で模擬することを考え、RTDS によって計算された電流を 0.018 倍して Bi-2223 線材に通電し、その際の発生電圧を 22000 倍して RTDS 内の電圧源として設定した。このような規模調整により、超伝導ケーブルのプロトタイプがどのような規模であっても実規模相当のシミュレーションが行えることを目指している。なお、今回の例では抵抗成分のみが反映されるため、インダクタンスに関しては RTDS の解析モデル上に考慮している。

### 3. 結果・考察

列車 1 と列車 2 が変電所 1 から変電所 2 に順に移動する際に得られた結果を Fig. 3 に示す。同図には超伝導ケーブルに流れる電流の時間変化を示している。まず、時刻  $t = 20$  s で列車 1 が変電所 1 から出発するが、その際の加速に必要な電流が超伝導ケーブルを通じて変電所 2 からも送られている様子がわかる。その後、時刻  $t = 56$  s で加速をやめるため、電力が送られなくなっている。もっとも大きな電流が流れているのは  $t = 100$  s 前後であるが、これは列車 1 が減速中で列車 2 が加速中のタイミングであり、列車 1 からの回生電力が列車 2 に超伝導ケーブルを通じて届けられたことを示している。以上のように、今回構築した HILS システムにより、Bi-2223 線材に通電した状況を超伝導ケーブルとして解析上に反映させることに成功した。また、同図には Bi-2223 線材を冷却せずに行った結果も示しているが、常伝導抵抗により電流はあまり流れず、冷却が失われても超伝導ケーブルとき電システムの双方に問題がないことを示している。このように、解析モデルの構築が困難な超伝導-常伝導状態間の遷移や、事故時などの様々な状況に対して、超伝導機器と電力系統との相互作用を模擬できる準備が整った。

### 謝辞

本研究の一部は、JST の戦略的イノベーション創出推進プログラム (S-イノベ) 「次世代鉄道システムを創る超伝導技術イノベーション」の支援によって行われたものである。

### 参考文献

- [1] M. Park et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. 19 (2004) 164.
- [2] H. Ohsaki et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. 23 (2013) 3600705.
- [3] M. Tomita et al., Journal of Applied Physics 111 (2012) 063910.

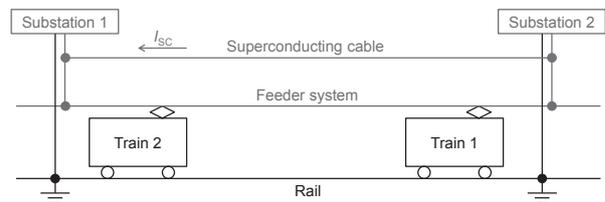


Fig. 1. Simple model for DC railway system with superconducting cable.

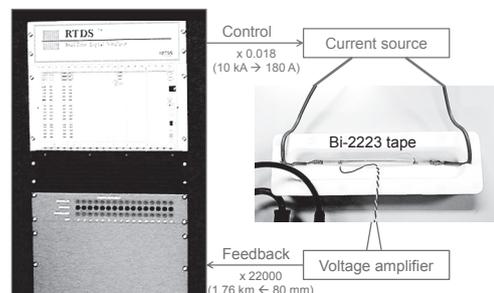


Fig. 2. Setup for the hardware-in-the-loop simulation (HILS) assuming superconducting cable.

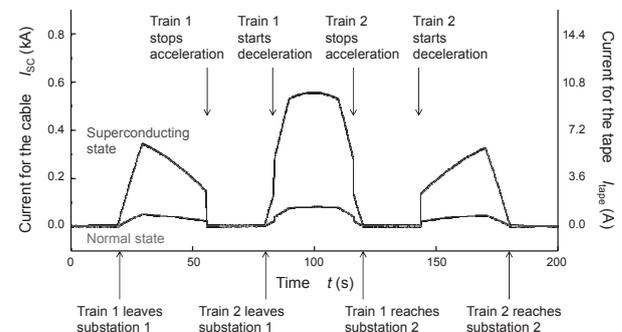


Fig. 3. Current waveforms for the superconducting cable obtained by the HILS. The results were obtained both in superconducting state and in normal state for the superconducting cable.

# HTS コイルを用いた非接触電力伝送装置における伝送効率の周波数特性

## Dependence of transmission efficiency on transmission frequency in wireless power transmission device using HTS coil

奈良光翼, 藤田晋士, 宮城大輔, 津田 理 (東北大)

NARA Kosuke, FUJITA Shinji, MIYAGI Daisuke, TSUDA Makoto (Tohoku University)

E-mail: narak@ecei.tohoku.ac.jp

### 1. はじめに

現在、非接触電力伝送装置は携帯電話や電気自動車の充電など様々な応用に適用されている。従来の非接触電力伝送装置では銅コイルを使用することから、伝送効率を高くするために高周波交流が採用されているが、スイッチングや表皮効果による伝送ロスが大きくなっている。そこで、HTSコイルを用いた低周波交流での高効率電力伝送を目指し、HTSコイルまたは銅コイルで構成されるモデル装置を用いて、伝送効率の周波数特性を比較・検討した。

### 2. 原理と実験方法

非接触電力伝送装置は、LC 回路の共振をとることで電力の高効率伝送を可能とする装置である。最も高効率となる共振周波数  $f_0$  は、送信側、受信側共に同じインダクタンス  $L$ 、キャパシタ  $C$  を持つとき、次のように表される。

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

また、伝送効率に大きく関係するコイルの  $Q$  値は、角周波数  $\omega$ 、コイルの巻線抵抗  $R$  を用いて次のように表される。

$$Q = \frac{\omega L}{R} \quad (2)$$

伝送効率の理論式において、効率が最大となる負荷のとき、伝送効率は、結合係数  $k$  を用いて次のように表される[1]。

$$\eta = \left\{ 1 + \frac{2(1 + \sqrt{1 + k^2 Q^2})}{k^2 Q^2} \right\}^{-1} \quad (3)$$

なお、従来の銅コイルを用いた非接触電力伝送においては、 $Q$  値を高めるために高周波が用いられている。本実験では、コイルを構成する線材が電力伝送特性に及ぼす影響を明らかにするために、HTS テープ線と同じ、厚さ 0.35 mm、幅 50 mm の銅テープ線を用いて、HTS コイルと同じコイル半径・高さ・ターン数を有する銅コイルを作製した。HTS コイルと銅コイルの諸元を、それぞれ Table.1, Table.2 に示す。また、両コイルの抵抗値の周波数特性を Fig.1 に示す。HTS コイルで発生する交流損失は通電電流の周波数に大きく依存するため、周波数の上昇に伴い抵抗値が大きく増加しているが、25 kHz 以下では銅コイルよりも抵抗値が低くなることが確認された。 $Q$  値は抵抗値に反比例するため、共振周波数が 25 kHz 以下の場合、HTS コイルを用いる方が、伝送効率が高くなることが考えられる。そこで、Fig. 2 の様な、共振周波数が 25 kHz 以下となる電力伝送回路を構成した。そして、それぞれのコイルを用いた装置において伝送効率の周波数特性を評価した。

### 3. 実験結果と考察

両コイルにおける非接触電力伝送効率の周波数依存性の測定結果を Fig.3 に示す。これより、両コイルともに、共振周波数の理論値に近い周波数で伝送効率が最大となっている。また、約 15 kHz という周波数領域において、HTS コイルで構成された非接触電力伝送装置の伝送効率が、銅コイルの場合の 2 倍以上になることが確認された。ただし、HTS コイルの電力伝送効率はまだ 30%以下と低いため、今後は伝送回路の構成方法を改善し、より低い周波数領域で高効率な非接触電力伝送ができるように検討していく予定である。

Table.1 Specifications of HTS coil

Wire	BSCCO
Radius [mm]	45
Height [mm]	10
Turns	10
Self-inductance $L_1, L_2$ [ $\mu$ H]	18.9
Gap of coils [mm]	30
Resonance frequency [kHz]	14.25
Mutual-inductance $M_{12}$ [ $\mu$ H]	3.57

Table.2 Specifications of copper coil

Radius [mm]	45
Height [mm]	10
Turns	10
Self-inductance $L_1, L_2$ [ $\mu$ H]	15.5
Gap of coils [mm]	30
Resonance frequency [kHz]	15.74
Mutual-inductance $M_{12}$ [ $\mu$ H]	2.95

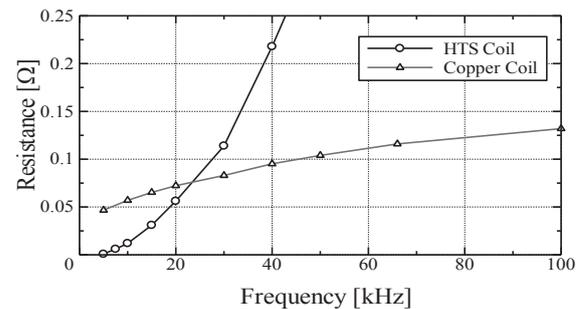


Fig.1 Dependence of coil resistance on current frequency

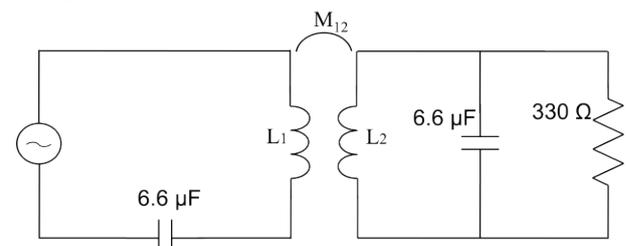


Fig. 2 Wireless power transmission circuit

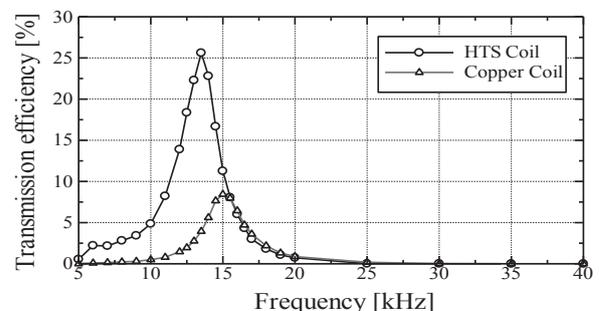


Fig. 3 Transmission efficiency in HTS and copper coils

### 参考文献

1. T.Takura, et al.:J. Magn. Soc. Jpn. (2011) p132-135

## JT-60SA 用超電導マグネット装置の製作と組立状況

### Manufacturing and assembly status of superconducting magnet components for the JT-60SA

吉田 清, 木津 要, 土屋 勝彦, 村上 陽之, 本田 敦, 柏 好敏, 小出 芳彦, 薄井 勝富, 夏目 恭平 (原子力機構)  
 YOSHIDA Kiyoshi, KIZU Kaname, TSUCHIYA Katsuhiko, MURAKAMI Haruyuki, HONDA Atsushi, KASHIWA Yoshitoshi,  
 KOIDE Yoshihiko, USUI Katsutomi, NATSUME Kyohei (JAEA)  
 E-mail: yoshida.kiyoshi56@jaea.go.jp

#### 1. はじめに

ITER のサテライトトカマクであるプラズマ実験装置 JT-60SA 装置 (Fig. 1) は、欧州と日本が共同で製作している。JT-60SA 用超電導マグネットと付属設備の実機製作は順調に進捗している。プラズマ真空容器の組立てに先立ち、装置の下部の平衡磁場 (EF) コイル 3 個が完成してクライオスタットの底部に仮置きされた。

#### 2. ポロイダル磁場コイル

日本が担当する中心ソレノイド (CS) と EF コイル用導体は、2010 年から超電導導体の量産を開始し、2013 年 3 月までに超電導撚線とジャケット材の製作を全て完了した。導体複合化は、CS と EF 導体 74 本 (全 92 本) の製作を完了した。NbTi 導体を用いた EF コイルの製作は順調に進捗しており、2012 年末に EF4 コイルが完成し、EF5 コイルと EF6 コイル (Fig. 2) が完成して、2013 年初めにクライオスタット底部に組込が完了した。さらに、上部の 3 個の EF コイルの製作を続行している。

Nb<sub>3</sub>Sn 導体を用いた超電導コイルの製作法を検証するための CS モデルコイルが完成し、その後の試験において特性の劣化が無いことを確認した。しかし、フィーダー用 NbTi 導体との接続抵抗が約 4 倍高い問題が見つかったため接続法の改良を行い、抵抗測定が完了して Nb<sub>3</sub>Sn コイルの製作法が検証された。CS1 実機パンケーキ巻線は 2015 年完成を目指して量産を開始した。

#### 3. トロイダル磁場コイル

TF コイル用導体製作は、F4E が担当し 2011 年から素線製作を開始し 2013 年には全ての素線の製作が完了した。導体複合化を 2012 年から開始して、コイル巻線の必要数に合わせて量産 (69/全 118 本) を続行した。

TF コイルは、CEA カダラッシュ研究所と ENEA 研究所が製作を担当し、フランスとイタリアの 2 か所の工場に D 型巻線を開始して、3 個のパンケーキ巻線が完成した。コイル容器の製作は、鍛造材 (250 トン) の材料に、極低温で不安定な機械特性が見つかったが、材料を別メーカーで再度製造し、満足する特性が得られた。加工された最初のコイル容器が 9 月に出荷された。TF コイル間構造物や支持脚の製作は順調に開始された。TF コイルの極低温の励磁試験装置は、CEA サックレー研究所に設置が開始され単独での動作試験を開始した。

#### 4. フィーダー

日本が担当する超電導給電設備として、超電導コイルに電流を供給するためのコイル端子箱 (CTB) とクライオスタット内の超電導フィーダー、さらに、超電導コイルにヘリウムを分配するバルブ箱 (VB) の製作を開始した。更に、極低温温度計やオリフィス流量計と、クエンチ検出器の製作を開始する。

CTB 内に設置する 26 本の高温超電導 (HTS) 電流リードは、KIT 研究所が製作を担当する。KIT では TF コイル用電流リード 2 本の製作が完了して、日本から送ったジャンパー導体と組み合わせて試験装置に組み込まれ、極低温試験が開始された。

#### 5. ヘリウム冷凍機

CEA グルノーブル研究所の担当するヘリウム冷凍機 (約 9kW@4.5K) は、フランスの工場などで部品製作が完了し、動作試験などを実施している。2015 年 4 月から那珂研究所で据付工事を開始する。また、日本側の担当の圧縮機棟の新築と冷凍機室の改造、タンク基礎の建築設備工事を続行している。

#### 6. サーマルシールド

日本が担当するサーマルシールド (TS) は、実機の下ポート側 TS から製作を開始した。現在、寸法測定や仮組立の手順を確認している。真空容器側サーマルシールドを 2015 年末までに製作して、本体組立の工程に合わせて搬入する。

#### 7. まとめ

各方面の努力で JT-60SA 用超電導マグネット装置の製作は順調に進捗し、JT-60SA 本体組立が開始された。マグネット装置は、本体組立の工程に合わせて搬入できるように、量産を続行する。

#### 参考文献

1. K. Yoshida, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 24, no. 3, (2014) 4200806

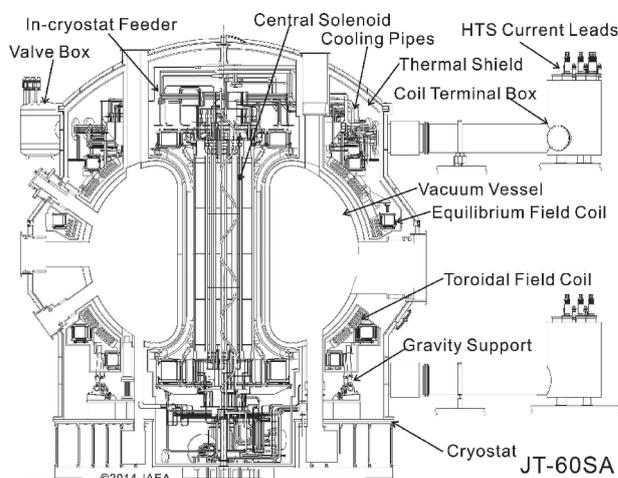


Fig.1 Cross section of JT-60SA basic device

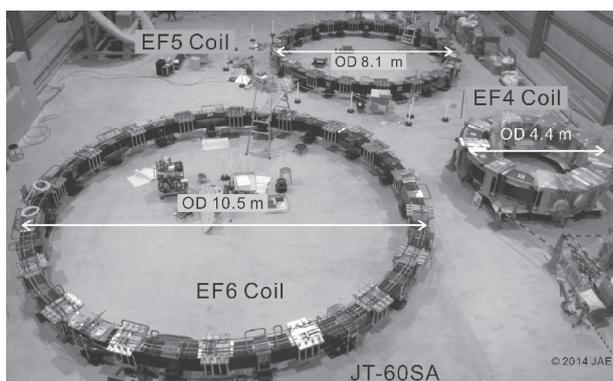


Fig. 2 Completion of Equilibrium Field Coil: EF4, EF5, EF6

## JT-60SA 超電導コイル用給電機器の設計と開発

### Design and development of the current feeding system for superconducting coils of JT-60SA

木津 要, 村上陽之, 夏目恭平, 土屋勝彦, 小出芳彦, 吉田 清 (JAEA); 尾花哲浩, 濱口真司, 高畑一也 (NIFS)  
 KIZU Kaname, MURAKAMI Haruyuki, NATSUME Kyohei, TSUCHIYA Katsuhiko, KOIDE Yoshihiko, YOSHIDA Kiyoshi (JAEA);  
 OBANA Tetsuhiro, HAMAGUCHI Shinji, TAKAHATA Kazuya, (NIFS)  
 E-mail: kizu.kaname@jaea.go.jp

#### 1. はじめに

JT-60SA の超電導コイルシステムは、18 個のトロイダル磁場(TF)コイル、10 個のポロイダル磁場(PF)コイルにより構成される[1]。PF コイルは 4 つのモジュールからなる中心ソレノイド (CS)と 6 個のプラズマ平衡磁場コイル(EF)コイルで構成される。TF と PF コイルの最大通電電流値は、それぞれ 25.7、20 kA である。それらの給電システムはクライオスタット内フィーダとコイル端子箱(CTB)で構成される[2]。CTB は、電流フィーダと高温超電導電流リード(HTS CL)を納めた断熱真空容器である。JT-60SA は JT-60U 装置の改修装置であり、既設設備があるため、Fig. 1 に示すように、5 台の CTB(CT01-05)をメインクライオスタットの周囲に分散して設置する設計とした。

給電機器の製作にはいくつかの課題があった。一つ目は、熱収縮により HTS CL に加わる力を減らすために曲げられたフィーダの製作性である。そこで、フィーダの試作を実施した。二つ目は、コイル設置後の狭小のクライオスタット内での超電導導体接続部(ジョイント)の製作性である。そこで、ジョイント接続治具を試作し、サンプルのジョイント抵抗測定を行った。本報告では、これら給電機器の試作とその結果について述べる。

#### 2. CTB とフィーダ設計

Fig. 2 に CTB の構造を示す。電源からの常電導ブスバーが HTS CL に接続される。超電導導体からなるフィーダが HTS CL の低温端に接続され、メインクライオスタットまで導かれる。クライオスタット壁近傍において、CTB 内のフィーダは、クライオスタット内フィーダにミッドジョイントを介して接続される。クライオスタット内フィーダはコイルのターミナルジョイントに接続される。HTS CL の最大許容磁場は 33 mT であるため、HTS CL はトラス中心より 12 m 離して設置する。HTS CL の水平方向の最大許容荷重は 560 N である。そこで、冷却時のフィーダの熱収縮による HTS CL の水平方向荷重を低減するために、フィーダを固定するサポートを設ける。固定サポートの応力を低減するためにフィーダをクランク型に曲げた構造とする。

#### 3. フィーダ試作

CTB 内のフィーダを固定サポートやクライオスタット内フィーダにミッドジョイントで接続するために、フィーダの製作公差を $\pm 10$  mmとした。PF フィーダの試作を超電導導体を使用して行った。その長さは 7.8 m であり、最小曲率半径は 150 mm である。この曲率半径において臨界電流の劣化が生じないことも試作により確認した。試作したフィーダの寸法を CAD 図と比較したところ最大の公差は 3 mm と要求の $\pm 10$  mm を満足した。

#### 4. ターミナルジョイント試作

PF コイルのターミナルジョイントは、導体同士を重ね合わせてはんだで接続するラップタイプジョイントを採用している。本ジョイントは EF コイルのパンケーキジョイントをベースに設計されている。しかし、ターミナルジョイントの接続作業は、クライオスタット内にコイルを設置した後の狭小空間で行うこと、パンケーキジョイントと異なりジョイントが鉛直方向であることから、

適切にはんだ接続できるかが課題であった。そこで、ジョイント接続の為にコンパクトな接続治具を開発し、運転条件(2 T、4.2 K、20 kA)でのジョイント接続抵抗を確認するために、本接続装置を用いてジョイントサンプルを試作した。本サンプルを核融合科学研究所(NIFS)の試験用超電導コイルに設置し[3]、4.2K での通電試験を行った。その結果、運転条件での接続抵抗は 1.7 n $\Omega$  と要求の 5 n $\Omega$  以下を達成した。

#### 5. まとめ

コイル給電機器のキーコンポーネントの試作・試験を行い要求を満足することを確認した。これより、コイル給電機器実機製作を開始できる見通しを得た。

#### 参考文献

1. K. Yoshida, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 22, no. 3, (2012) 4200304
2. K. Yoshida, et al.: Fusion Eng. Des. 88 (2013) 1499-1504
3. T. Obana, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 20, no. 3, (2010) 1471-1474

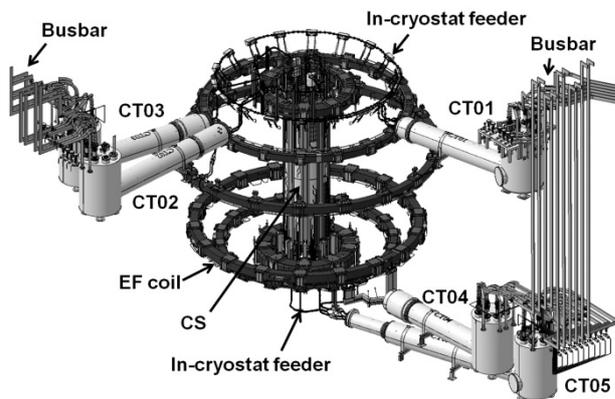


Fig. 1. The current feeding system of JT-60SA. Several TF and EF coils are invisible in this figure.

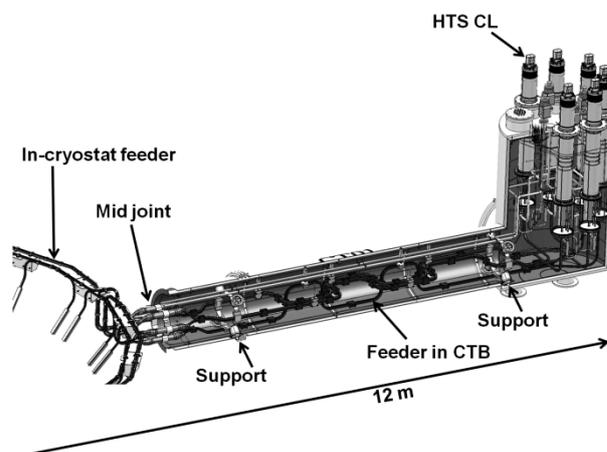


Fig. 2. The structure of CTB.

# JT-60SA 中心ソレノイドモデルコイルの臨界電流評価

## Evaluation of Critical Current for JT-60SA Central Solenoid Model Coil

村上 陽之, 木津 要, 夏目 恭平, 土屋 勝彦, 小出 芳彦, 吉田 清(原子力機構);

尾花 哲浩, 高畑 一也, 濱口 真司, 力石 浩孝, 今川 信作, 三戸 利行(NIFS);

MURAKAMI Haruyuki, KIZU Kaname, NATSUME Kyohei, Tsuchiya Katsuhiko, KOIDE Yoshihiko, YOSHIDA Kiyoshi (JAEA);

OBANA Tetsuhiro, TAKAHATA Kazuya, HAMAGUCHI Shinji,

CHIKARAISHI Hirotaka, IMAGAWA Shinsaku, MITO Toshiyuki (NIFS);

E-mail: murakami.haruyuki@jaea.go.jp

### 1. はじめに

JT-60SA 装置の中心ソレノイド(CS)は、実機製作開始前の性能確認のため、実機と同じ半径を持つ 4 層の試作コイル(モデルコイル)を製作し通電試験を実施した[1]。

磁場が最大となる最内層の温度が、温度計の接触不良により 4 K 近傍の計測ができなかったため、正確な臨界電流の評価ができなかった。そこで、層間の熱伝導などを考慮した温度解析を実施することで最内層の温度を計算し、臨界電流の再評価を行った。本発表では、今回実施した温度解析の概要および臨界電流の評価結果について報告する。

### 2. 温度解析モデル

CS モデルコイル(図 1)の冷却は、巻線中央から SHe を供給し(+極側と-)極側の二流路に分かれ両端の電流フィーダから排出される。CS モデルコイルには、冷媒入口(T1)、巻線最内層(T3,T4)、巻線出口(T5,T6)および冷媒出口(T7,T8)に温度計を取り付けた。それぞれ番号の小さいものが(-)極側に取り付けた温度計である。常温から 4 K 付近まで冷却した時の温度推移を図 2 に示す。T3~T6 のモデルコイルに取り付けた温度計は、接触不良により 4 K 付近では放射や計測線からくる熱伝導の影響を受け、正確な温度計測ができなかった。そこで、供給温度(T1)を用いて臨界電流を評価したところ、素線特性から求められる値と約 1 K の差があった[1]。

これは、最内層温度が供給温度より高くなることに起因すると考え、図 3 に示すように層間およびターミナル部の熱伝導を考慮した温度解析モデルを用いてモデルコイル内の温度分布を評価した。解析は流体解析コード Flower[2]を用いて実施した。温度計に加わる放射や熱伝導の影響は、サーマルシールドの温度に近い 80 K 付近では小さくなるため、層間およびターミナル部の熱伝導係数は 80 K 近傍の温度解析を行い決定した。4 K 近傍の温度解析は、熱伝導係数を絶縁物や銅の熱伝導率に比例して変化させ計算を行った。

4 K 近傍の温度分布は、放射により第一層に定常の入熱を仮定し計算した。ヘリウム流量は、実験値と同じ値になるよう巻線部の水力直径を変化させ調整した。

### 3. 解析結果

モデルコイルに 14 K のヘリウムを供給した時の温度解析の結果を図 4 に示す。サーマルシールドからの放射により第一層が温められ、温められた第一層からの熱伝導により第二層も温められており、最内層の温度は供給温度より 1.1 K 程度高くなることが分かった。

以上より、供給温度を用いて評価した臨界電流と素線特性から求められる臨界電流間の約 1 K の差は、最内層の温度が上昇していることに起因することが示され、CS の製作過程において導体性能が劣化していない事が確かめられた。

### 参考文献

1. H. Murakami, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 88 (2013) p.112

2. FLOWER: Hydraulic Network Simulation. [http://botturl.web.cern.ch/botturl/CryoSoft/manuals/Flower\\_4.4.pdf](http://botturl.web.cern.ch/botturl/CryoSoft/manuals/Flower_4.4.pdf)

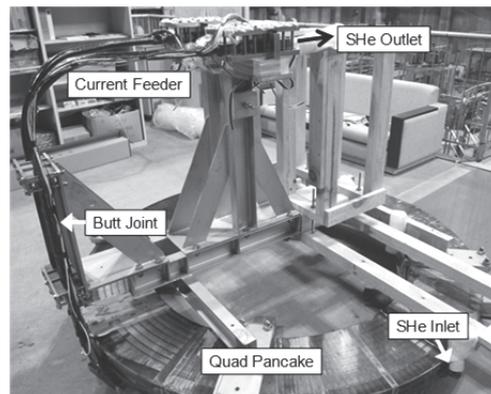


Fig.1 JT-60SA central solenoid model coil

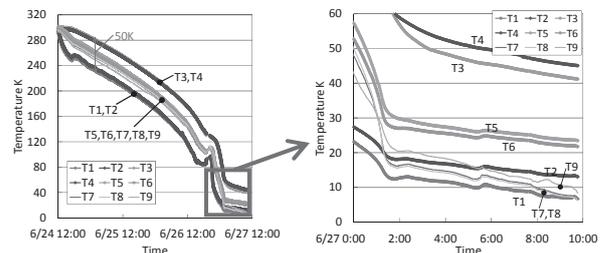


Fig.2 Temperature measurement of CS model coil

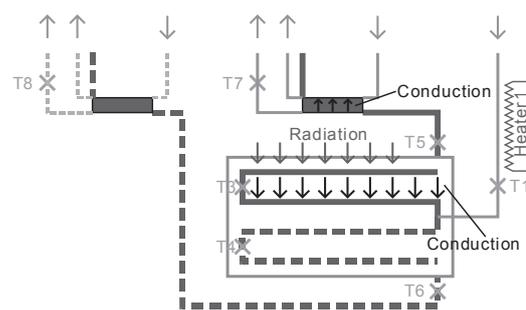


Fig.3 Model for temperature analysis

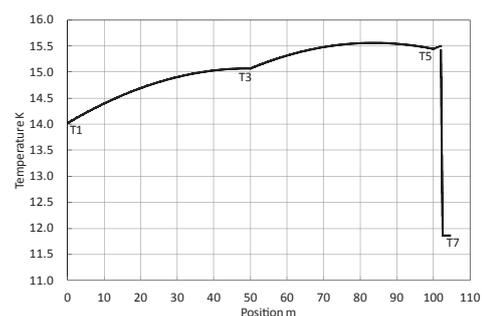


Fig.4 Analysis result

## JT-60SA ヘリウム配管の温度素子設置方法 Thermometer attachment methods on a helium pipe for JT-60SA

夏目恭平、村上陽之、柳俊樹、木津要、吉田 清 (JAEA)

NATSUME Kyohei, MURAKAMI Haruyuki, YANAGI Shunki, KIZU Kaname, YOSHIDA Kiyoshi (JAEA)

E-mail: natsume.kyohei@jaea.go.jp

### 1. はじめに

JT-60SA 計画では、超電導コイルに冷媒ヘリウムを分配するためのバルブボックス (VB) と、高温超電導電流リードと電源バスバーとの取り合い部を含むコイルターミナルボックス (CTB) が新たに製作される。本講演では、真空排気される VB 及び CTB の中にある冷媒配管内のヘリウム温度を測定する素子の設置方法について述べる。温度素子を配管内部に導入した細管内に設置する方式と、配管外部に銀蝨溶接された銅ブロック内に設置する方式との差異を、実環境を模擬して行った実験により比較・評価した結果を報告する。

### 2. 温度素子設置方法

Fig. 1 は冷媒配管への温度素子設置方法の概念を配管断面図を用いて示している。図中左側はステンレス鋼 (SUS) 細管を冷媒配管に井戸のように導入し、温度素子を設置する方法 (Well method) を表し、右側は銅 (Cu) ブロックを配管に銀蝨溶接し、温度素子を設置する方法 (Block method) を表す。

ウエル方式は素子の入った細管が流れる冷媒に直接晒されているため、冷媒の温度を比較的正確に測定できるが、配管に穴を開けて溶接する必要があり、製作時に気密・耐圧試験が必要になる。一方、ブロック方式は配管の外側に素子フォルダがあるため、冷媒との熱的な距離が遠く、外部からの熱侵入の影響を受けやすい。そこで本研究では、十分な測定精度を持ち、製作性も兼ね備えた素子設置方法をブロック方式によって実現すべく、試験配管を製作し実験を行った。

### 3. 設置方法比較実験

一つの配管に上述した両方の方法でそれぞれ温度素子を設置した。計測線からの素子への熱侵入を防ぐため、熱アンカ用の銅ブロックを素子フォルダとは独立に配管に銀蝨溶接し、その上に薄型プリント基板を接着し、配線した。また熱放射を防ぐために 4.2 K のサーマルシールドを被せ、外側に MLI (Multi Layer Insulation) を施した。素子設置には、CERN における低温温度計に関する文献[1]と[2]及び[3]等を参考にした。

製作した試験配管を断熱真空層を備えたクライオスタットに接続し、液体ヘリウムを充填する。配管内部を加圧・減圧することで液体ヘリウムの温度を変化させ、測定された値を比較・評価する。また、参照用の温度素子は直接液体ヘリウムに浸され、配管内に設置されている。

### 4. 実験結果

Fig. 2 は実験結果の例として、配管内ヘリウムの温度を 3.37-4.23 K で変化させた時のそれぞれの温度計の表示値を表している。Fig. 3 で示す温度差は、それぞれの温度計の表示値から参照用の温度計の表示値を引いた値である。ブロック方式の値は参照温度計の値よりも 0-13 mK 程度高く、ウエル方式の値は 2-10 mK 程度低いことがわかる。実験で使用した Cernox™ 温度センサの 4.2 K 付近での精度は  $\pm 5$  mK [3] であり、温度差はほぼその範囲 ( $\pm 10$  mK) に収まっていることから、精度よく測定できていると考えられる。

### 5. まとめ

本実験によって、今回採用した設置方法を用いれば、比較的製作が容易なブロック方式であっても、十分な精度で真

空中の配管内のヘリウム温度を測定できることが確認できた。本講演では、より詳細な素子設置方法と実験結果を報告する。

### 参考文献

1. C. Balle and J. Casas: Advances in Cryogenic Engineering 41 (1996) pp1715-1721.
2. C. Darve and J. Casas: Cryogenics 41 (2001) 319-326.
3. "Temperature Measurement and Control Catalog" Lake Shore Cryotronics, Inc..

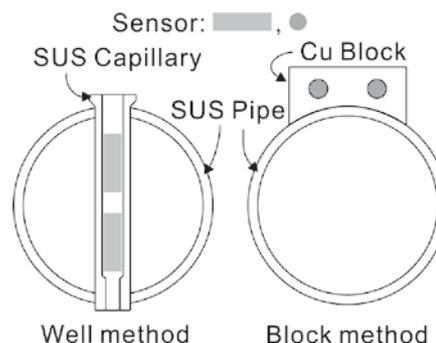


Fig. 1 Concept of thermometer attachment methods

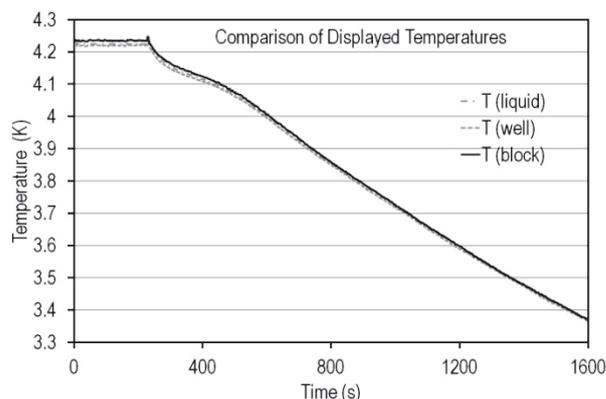


Fig. 2 Comparison of the displayed temperatures

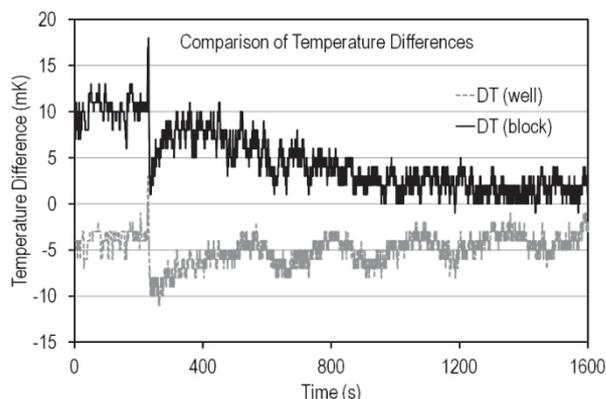


Fig. 3 Comparison of the temperature differences between one of attached thermometers and one of a thermometer immersed in liquid helium in the pipe.

# 導体接続方式ヘリカルコイル設計のための REBCO テープの機械的ラップジョイントの引張・せん断強度評価 Evaluation of tensile and shear strength of mechanical lap joint of a REBCO tape for a design of joint-winding-type helical coil

伊藤 悟, 小黒 英俊(東北大); 田村 仁, 柳 長門, 相良 明男(NIFS); 橋爪 秀利(東北大)  
ITO Satoshi, OGURO Hidetoshi (Tohoku Univ.); TAMURA Hitoshi, YANAGI Nagato, SAGARA Akio (NIFS);  
HASHIZUME Hidetoshi (Tohoku Univ.)  
E-mail: satoshi.ito@qse.tohoku.ac.jp

## 1. はじめに

ヘリカル型核融合炉 FFHR-d1 のヘリカルコイルの高温超伝導コイルオプションとして、短尺の REBCO 導体を接続して巻き線する導体接続巻線方式のマグネットを提案している [1,2]。本コンセプトでは導体を構成する REBCO テープ(線材)を機械的ラップジョイントで接続することを想定している。本研究では、まず GdBCO 線材の機械的ラップジョイントの引張試験を行った。また FFHR-d1 のコイルおよび支持構造材をモデル化した構造解析と併せて線材接続部(接合部)の機械的強度について議論したので、その内容について報告する。

## 2. 引張試験

Fig. 1 に実験体系を示す。5 mm 幅の銅安定化層付き GdBCO 線材(フジクラ製 FYSC-SC05)の銅層(接合面)を研磨(#400 研磨紙)した後、エタノールで洗浄し、In 箔(100 μm 厚)を接合面に挿入して、機械的ラップジョイントサンプル(接合長 5 mm)を製作した。全てのサンプルにはジグで接触圧力 100 MPa を加え、その後、一旦、ジグを外して接触圧力を解除した(In 箔の変形により、接合面は圧着された状態になっている)。この状態のサンプル(接触圧力 0 MPa)および再度ジグにより接触圧力を加えたサンプル(接触圧力 11, 25, 50, 100 MPa)をそれぞれ Fig. 1 に示す試験部に設置し、液体窒素中で引張試験を行った。引張負荷はステッピングモータ(定回転速度)で与え、電流 50A をサンプルに印加した。評価項目は引張負荷(ロードセル)、GdBCO 線材のひずみ(ひずみゲージ)、サンプル全体の変位(クリップゲージ)、接合部の電圧(電圧タップ)とした。Fig. 2(a)に各サンプルにおいてサンプル全体のひずみが急上昇した際の引張負荷(接合面が滑った際の引張負荷、すなわち接合部の引張強度を示す)と接合コンダクタンス(接合抵抗の逆数)を示す。また、Fig. 2(b)に接合部の引張強度、サンプルの電圧が急上昇した際の負荷と接触圧力の関係を示す。接合コンダクタンスの増加にともない、接合部の引張強度は増加した。また、引張負荷 600 N 付近で GdBCO 線材のひずみは不可逆ひずみである約 0.4% [3] を超えており、11 MPa 以上の接触圧力を加えた状態のサンプルでは、接合部の引張強度は GdBCO 線材の使用限界よりも大きいことが確認された。

## 3. 構造解析

FFHR-d1 に高温超伝導コイルを適用した場合のヘリカルコイル、垂直磁場コイルおよび支持構造材をモデル化し、電磁力を考慮した構造解析を行った。Fig. 3 に得られたヘリカルコイル巻線方向の引張ひずみ分布を示す。ヘリカルコイルに発生する最大引張ひずみは 0.145% であり、GdBCO 線材の不可逆ひずみを下回る値となっている。現行設計 [4] では、機械的ラップジョイントの接合長は REBCO 線材 1 層あたり 38 mm となっており、引張試験の結果を踏まえれば、線材接続部の引張強度は十分あると考えられる。また、構造解析によって得られた REBCO 線材部の最大せん断応力は 32 MPa であった。引張試験において、接合面(銅層)と In 箔の界面および In 箔自体はせん断応力を受けている状態であり、引張負荷

800 N のときに、これらにせん断応力 32 MPa が発生している状況に相当する。引張試験結果を踏まえると、REBCO 線材部に発生するせん断力に耐えるためには、接触圧力 50 MPa 以上が必要であると言える。

## 参考文献

1. N. Yanagi, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 24 (2014) p.4202805
2. A. Sagara, et al.: Fusion Eng. Des., Vol. 89 (2014) p.2114
3. M. Sugano, et al.: Supercond. Sci. Technol., Vol. 25 (2012) p. 054014
4. S. Ito, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 24 (2014) p.4602305

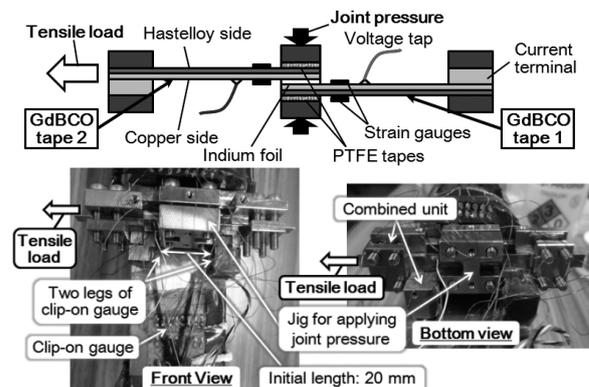


Fig. 1 Experimental set-up in the tensile test for mechanical lap joint of GdBCO tape with an inserted indium foil.

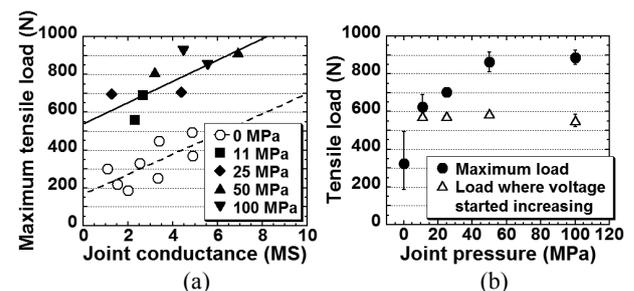


Fig. 2 Results of the tensile test: (a) Maximum applied tensile load as a function of the joint conductivity obtained in the condition of a joint pressure of 0, 11, 25, 50 and 100 MPa. (b) Maximum tensile load and the load where the voltage started increasing as a function of joint pressure.

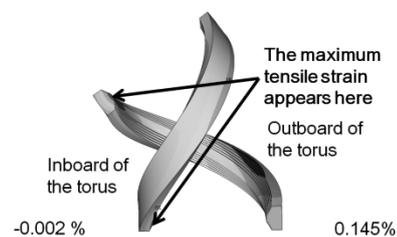


Fig. 3 Normal strain distribution along the winding direction of the helical coils.