

高磁場 MRI 用高温超電導磁石開発の進捗(15 年秋)

-進捗概要-

Progress in the development of an HTS magnet for ultra-high field MRI (2015 autumn)

- Project status -

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

1. はじめに

REBCO 線材は、磁場中の臨界電流密度が高いこと、長手方向の機械強度が高いことなどから、NbTi 線材などを用いた低温超電導磁石では実現が難しい大口径、高磁場の磁石が実現できることが期待されている。このような背景のもと、REBCO 磁石を 9.4 T-MRI に適用することを目指すプロジェクトが 2013 年度からスタートした。本プロジェクトの目的は、モデルコイルやモデル磁石を設計・試作するとともに電磁界解析等によって、高磁場 MRI 用 REBCO 磁石の課題やその困難度を明らかにすることである。今年度は、本プロジェクト最終年度として、2016 年 3 月までに以下項目の達成を目指している。

- ① 10 T モデルコイルによる 9.4 T 発生の実証
- ② 1.5 T モデル磁石で $\phi 200$ mm 球状空間 (DSV) での均一磁場発生の実証
- ③ 撮像による 1.5 T 磁石の磁場品質の評価

10 T モデルコイルは、内径 $\phi 50$ mm、外径 $\phi 129$ mm のシングルパンケーキコイルを 22 枚積層したコイルであり、これまでに、9.52 T の発生を実証した。1.5 T モデル磁石は、Fig. 1 に示す 3 対のスプリットコイルから構成される冷凍機伝導冷却磁石であり、現在、コイルとクライオスタット、撮像装置等の製作を進めている。

2. 研究開発の進捗

本プロジェクトでは、高磁場 MRI への REBCO 磁石の適用に関する様々な技術課題に取り組んできたが、特に重要な技術課題について、これまでの研究開発成果と進捗を以下に述べる。

(1) 遮蔽電流磁場の均一磁場空間への影響

高磁場下での遮蔽電流による不整磁場の評価を、前述の 10 T モデルコイルを用いておこなった。実験値と電磁界解析値を比較したところ、遮蔽電流磁場の振る舞いは、解析でほぼ再現できることがわかった。10 T モデルコイルは内径が小さいため、観測された遮蔽電流磁場は数%レベルと極めて大きかったが、試設計したヒト全身用磁石で遮蔽電流磁場を解析評価したところ、その影響度は z^2 : -61 ppm、 z^4 : 34 ppm、 z^6 : -22 ppm であり、鉄シム、アクティブシム、超電導シムなどで、補正できるレベルであることがわかった。

(2) 巻線寸法誤差の均一磁場への影響

NbTi 線材のような丸線を用いて俵積みで巻線する場合には、巻線寸法の自由度が高く、寸法誤差を抑制する巻線手法が確立されているが、REBCO 線材のようなテープ線材をパンケーキ巻線し、それを積層してコイルを構成する場合には、巻線寸法誤差による不整磁場を抑制することは、新たな技術課題となる。その検証は、1 T モデル磁石でおこなった。1 T モデル磁石のコイルは、内径 $\phi 400$ mm の 2 組のスプリットコイル (シングルパンケーキコイルを 4 積層したユニットコイルのペア

と 2 積層のユニットコイルのペア) から構成され、均一磁場空間は 100mm DSV で設計されている。1 T モデル磁石の磁場分布測定したところ、最大で約 400 ppm の不整磁場が観測されたが、その原因として、シングルパンケーキ積層や、ユニットコイル組立時の z 軸方向の寸法誤差が影響していることがわかった。現在、この知見を反映して 1.5 T モデル磁石の製作を進めている。

(3) 時間的な磁場の安定性

REBCO 線材の超電導接続は実用レベルになっていないため、REBCO 磁石では MRI で必要となる電流減衰率での永久電流モード運転ができず、電源を常時接続した励磁で、時間的に安定な磁場を発生することが必要となる。その検証を目的として、超高安定化電源で励磁した 1 T モデル磁石の磁場の時間変動を評価したところ、コイル温度が数 K 上昇することで、電源電流の変動よりも一桁以上大きい磁場の変化 (上昇) が観測された。この原因としては、遮蔽電流の磁気緩和が影響していると考えている。すなわち、コイル温度が上昇することで、REBCO 線材の臨界電流密度が低下し、そのために遮蔽電流の減衰が促進されたと推定している。MRI 用の伝導冷却 REBCO 磁石では、コイル温度の制御が非常に重要であることがわかった。

3. まとめ

REBCO 磁石を 9.4 T-MRI への適用を目指したプロジェクトの研究開発進捗について述べた。今年度は、プロジェクトの最終年度として、1.5 T モデル磁石の試作、評価を進め、高磁場 MRI 用磁石に必要な基盤技術の確立を目指していく。

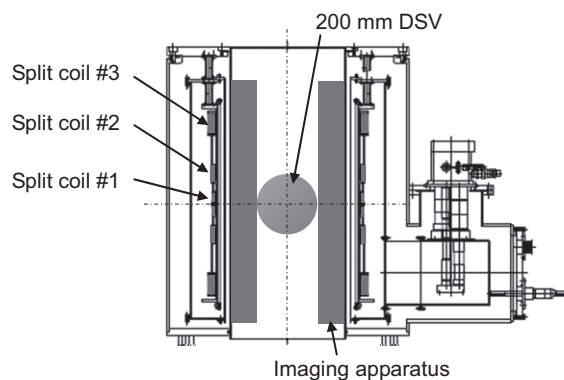


Fig. 1 Schematic view of the 1.5 T model magnet

<謝辞>

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

高磁場 MRI 用高温超電導磁石開発の進捗(15 年秋) — 極小口径 10T コイルの開発 —

Progress in the development of an HTS magnet for ultra-high field MRI (2015 autumn)
— a small size 10 T class HTS coil —

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

1. はじめに

REBCO コイルの高磁場化, および遮蔽磁場の影響評価を目的に, REBCO 線材を用いて, 内径 50 mm, 外径 129 mm, ターン数 240 ターンのシングルパンケーキを 22 枚積層して構成する極小口径コイルを開発し, 10 T 級の高磁場発生を検証を進めている. これまでに伝導冷却下で中心磁場 7.66 T の発生と 0.41 T の遮蔽磁場を観測している [1]. このような遮蔽磁場は, 使用する線材ごとの臨界電流特性に依存することから, 同諸元のシングルパンケーキを積層する場合でも, 積層順によって変化する可能性がある. そこで, 今回, 既存のシングルパンケーキの積層順を入れ替えることで, 遮蔽磁場がどのように変化するかを調査した. また, 10 T 級の高磁場発生に向け, 一部を磁場中の臨界電流特性が向上した線材で試作したシングルパンケーキに交換し, 改良を図った.

2. 遮蔽磁場に対する積層順の影響調査

シングルパンケーキの 77 K での臨界電流値(I_c)を積層順に並べたグラフを Fig. 1 に示す. 既報の積層順が(a)であり, 既存のシングルパンケーキを入れ替えた積層順が(b)である. また, 積層上下端に磁場中の臨界電流特性が向上した線材で試作したシングルパンケーキを新たに配置した際の積層順が(c)である. (a)は, 上から昇順に配置しており, 一方, (b)はコイル中心($z=0$)に対して中心軸(z 軸方向)方向に I_c が対称になるように配置した. (a)と(b)の各積層順で伝導冷却試験を実施し, いずれかのパンケーキ 2 つ分の電圧が 5×10^{-8} V/cm に達するまで通電を行い, 同時に中心軸上の磁場分布を Fig. 2 の位置でホール素子により計測した. 得られた磁場の実験値から, 磁場係数により算出した計算値を差し引くことで遮蔽磁場を見積もることとした. なお, 磁場係数には, 常電導状態となる 100 K で測定した値を使用した. コイル温度 10 K での最大通電時における遮蔽磁場を Fig. 3 に示す. シングルパンケーキの I_c の配置を対称に配置した(b)の積層順では, (a)と比較して, より対称な遮蔽磁場が得られており, シングルパンケーキの I_c によって発生する遮蔽磁場の対称性が変化する結果が得られた.

3. シングルパンケーキの交換による発生磁場の向上

さらに, 積層上下端に位置する 12 枚について, 磁場中の臨界電流特性が向上した線材で新たに試作したシングルパンケーキを配置し, 再度, 伝導冷却試験を実施した. コイル温度 10 K における中心磁場, および遮蔽磁場を Fig. 4 に示す. 中心磁場は, 200 A 通電時に最大 9.52 T に達し, 常電導状態となる 100 K で測定した磁場係数による計算値は 10.02 T であることから, 約 0.5 T の遮蔽磁場が観測された.

4. まとめ

極小口径コイルにおいて, 積層順が遮蔽磁場に与える影響を調査したところ, シングルパンケーキの I_c によって発生する遮蔽磁場の対称性が変化する結果が得られた. また, 磁場中の臨界電流特性が向上した線材で試作したシングルパンケーキにより中心磁場 9.52 T を達成し, 10 T 級の高磁場発生

時に約 0.5 T の遮蔽磁場を観測した. 引き続き, コイル温度や通電パターン等を変化させて, 遮蔽磁場の評価を進める.
<謝辞> 本研究は, 日本医療研究開発機構の未来医療を実現する医療機器・システム研究開発事業「高磁場コイルシステムの研究開発」を通じて実施された.

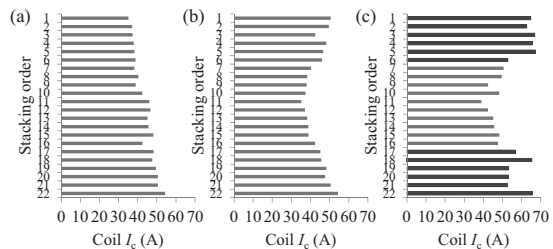


Fig. 1 Stacking orders based on the coil I_c at 77 K: (a) ascending order (b) symmetric order and (c) the latest stacking order with the improved single pancakes

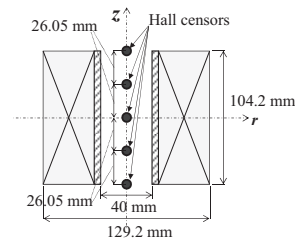


Fig. 2 Schematics of the Hall sensors and the coil

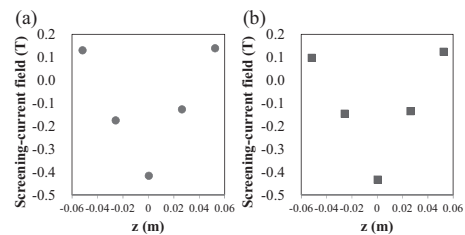


Fig.3 Screening-current field at 10 K: (a) ascending order with 166 A and (b) symmetric order with 178 A

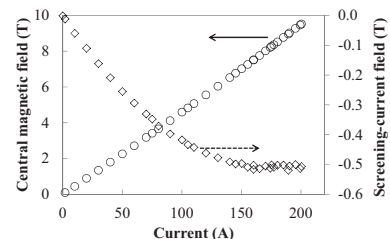


Fig.4 Central magnetic field and screening current field with 200 A at 10 K

参考文献

1. H. Miyazaki, et al., Abstracts of CSSJ Conference, Vol.90 (2014) p.193

高磁場 MRI 用高温超電導磁石開発の進捗(15 年秋)

—伝導冷却 1.5 T-MRI 磁石の開発—

Progress in the development of an HTS magnet for ultra-high field MRI (2015 autumn)

—a conduction-cooled 1.5 T REBCO MRI magnet—

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

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

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

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

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

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

1. はじめに

REBCO 線材を用いて、室温ボアφ400 mm の伝導冷却型 1.5 T-MRI マグネットを開発し、撮像評価することを目的としている。マグネットは、内径φ500 mm のシングルパンケーキ 60 枚で構成され、撮像空間は 200 mm DSV である。本発表では、1.5 T-MRI マグネットの最適コイル配置設計結果およびマグネット製作状況について報告する。

2. コイル配置設計

線材幅 4 mm、線材厚 0.1 mm の REBCO 線材を使用したシングルパンケーキを用いた 1.5 T-MRI のコイル配置を検討した。前提条件として、コイル内径φ500 mm、コイル数 3 対(6 ユニット)、均一磁場空間 200 mm DSV、中心磁場 1.5 T、運転電流値 300 A 以下とした。シングルパンケーキのターン数、シングルパンケーキを積層した各コイル間距離をパラメータとして、空間磁場分布を計算し、不整磁場が極小となるコイル配置を導出した。コイル配置を Fig.1 に示す。外径が異なる 3 種類のシングルパンケーキ 60 枚で構成され、線材全長は 10.3 km である。球面調和関数の各次の係数を Table1 に示す。均一度は 200 mm DSV にて 3.3 ppm(VRMS) および 47.7 ppm(peak to peak)となった。コイル数を増やすことで不整磁場をさらに減らすことができるが、組立が複雑になるため、コイル数は 6 とした。

3. シングルパンケーキ製作

REBCO 線材の厚みは 0.01 mm 程度の公差があるため、単純に巻線するとシングルパンケーキ外径またはターン数が設計寸法と異なり、大きな不整磁場が生じる要因となる。そこで、シングルパンケーキのターン数を設計値に合わせ、外径は 10 ターン毎に寸法を測定しながら絶縁物の量を調整することで誤差 0.4 mm 以下となるように巻線を実施した。これまで 4 コイル分(コイル A およびコイル B)のシングルパンケーキ巻線が完了し、すべて液体窒素中にて通電試験を実施した。試験結果を Fig. 2 に示す。REBCO 線材の超電導特性のばらつきによりシングルパンケーキの I_c にわずかなばらつきがみられるが、 10^{-9} V/cm から 10^{-8} V/cm の $V-I$ 特性から定義したコイル n 値はすべて 25 以上であり、超電導特性に劣化がないことを確認した。また、すべてのシングルパンケーキの外径寸法および厚みを測定し、外径は誤差 0.4 mm 以下、コイル厚みは誤差 0.2 mm 以下であることを確認した。

4. まとめ

REBCO 線材を用いた 1.5 T-MRI の開発を進めている。最適コイル配置設計を実施し、不整磁場を極小とするコイル配置を決定した。また、4 コイル分のシングルパンケーキを完成し、良好な超電導特性を有していることを確認した。現在、コイルと並行してクライオの製作も進めており、12 月より試験を開始する予定である。

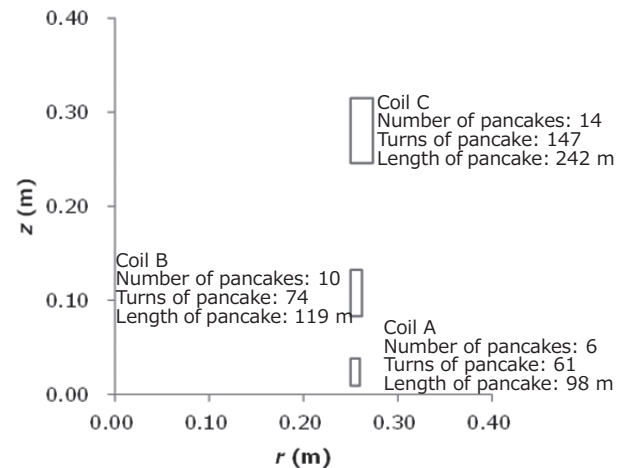
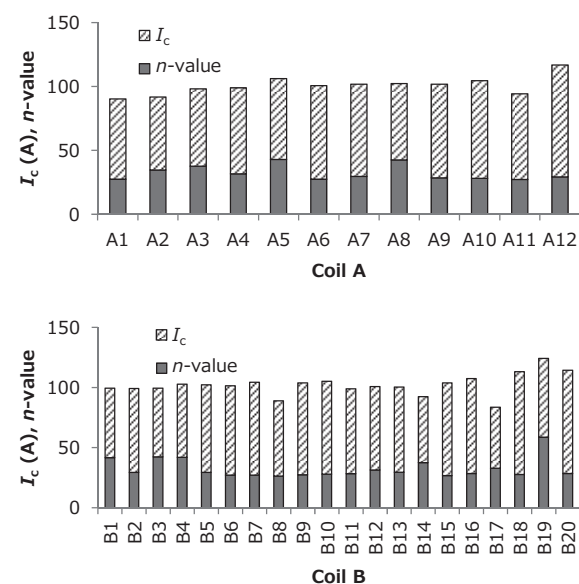


Fig.1 Two-dimensional axisymmetric drawing of coil positions

Table1 Inhomogeneous magnetic field over 100 mm DSV

Name	Z2	Z4	Z6	Z8	Z10	Z12
Value (ppm)	-1.51	4.72	-5.12	-30.2	-10.9	4.68

Fig.2 Coil critical currents (I_c) and the n -values of the single pancakes

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

高磁場 MRI 用高温超電導磁石開発の進捗(15 年秋)

9.4 T ヒト全身用 MRI コイルにおける遮蔽電流による不整磁場と磁場均一度の評価
 Progress in the development of an HTS magnet for ultra-high field MRI (2015 autumn)
 - Numerical evaluation on irregular field by screening current and field homogeneity
 in REBCO Coil for 9.4-T human-whole-body MRI -

松見 絢子, 王 韜, 石山 敦士 (早大); 植田 浩史 (阪大);

野口 聡 (北大); 宮崎 寛史, 戸坂 泰造, 野村 俊自, 来栖 努 (東芝)

MATSUMI Ayako, WANG Tao, ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.); UEDA Hiroshi (Osaka Univ.);

NOGUCHI So (Hokkaido Univ.); MIYAZAKI Hiroshi, TOSAKA Taizo, NOMURA Shunji, KURUSU Tsutomu (Toshiba)

E-mail: atsushi@waseda.jp

1. はじめに

我々は、10 T 級 (9.4 T) のヒト全身用 MRI の実現を目指している[1]。高温超電導コイルにおいて、高温超電導線材がテープ形状をしているため、遮蔽電流が顕著に誘導され、それによって生じる不整磁場がコイルの発生磁場の空間的均一性や時間的安定性を損なう可能性がある。今回は、上記プロジェクトで設計・検討を行った実規模 (1000 mmφ、9.4 T 級ヒト全身用) コイルを対象として、これまでに開発した 3 次元電磁場解析手法を用いて、不整磁場が撮像空間の磁場均一度に与える影響について評価・考察したので報告する。

2. 解析モデル

2.1 モデルコイル

解析に用いたモデルコイルの概略図および磁場分布を Fig. 1 に、使用 REBCO 線材とコイルの諸元をそれぞれ Table 1、Table 2 に示す。内径 1000 mm、中心磁場 9.4 T、アクティブシールド付き (5 ガウスラインは径方向 7 m、軸方向 12 m) で、電磁応力 500MPa の制約下で、使用線材量を最少かつ 2~10 次の磁場不均一度を 400-mm DSV において 100 ppm 以下になるように設計されている[2]。今回は、遮蔽電流の影響を評価しつつ設計を進める設計プロセスの初期段階であるため、均一度の制約は緩くした。それぞれのスプリットコイルはシングルパンケーキコイル (SP) が積層されており、電流密度はパンケーキコイル内で一様として最適化されている (Design model)。

2.2 不整磁場解析条件

上述のモデルコイルに対して、解析では、実際の巻き方を考慮してダブルパンケーキコイル (DP) の積層構造とし、超電導層にのみ電流が流れるとした (Analysis model)。運転温度は 20 K、 n 値は 20 一定とした。全コイルを同時励磁し、励磁完了後 1 時間ホールドすると仮定した。開発した 3 次元電磁場解析プログラムを用いて不整磁場を計算し、球面調和関数展開を用いて、磁場均一度に与える影響を評価した[3]。

3. 結果・考察

均一度の計算結果を Table 3 に示す。Design model は SP コイル積層の設計値 (コイル内均一電流を仮定)、Analysis model は DP コイル積層の計算値であり、いずれも遮蔽電流の影響を含まないモデルである。一方、Screening-current model は影響を含む DP コイル積層モデルである。Table 3 より、Design model に対して Analysis model の値が悪化している。これは、DP コイルによる渡り部分の影響であると考えられる。また、Screening-current model では、遮蔽電流磁場の影響により全次数について、特に 2 次の項の均一度が顕著に悪化した。詳細は当日報告する。

<謝辞>

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

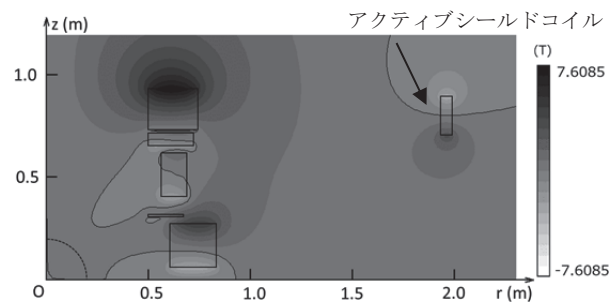


Fig. 1. Schematic of coil system and Distribution of radial component of ideal magnetic field. Dotted line show the 400-mm diameter of spherical volume.

Table 1. Specifications of HTS tape

Table 1. Specifications of HTS tape		
Thickness	Width	5 mm
	Substrate	78 μ m
	REBCO	2 μ m
	Copper	20 μ m

Table 2. Specifications of model magnet

Table 2. Specifications of model magnet						
	Coil 1	Coil 2	Coil 3	Coil 4	Coil 5	Coil 6
Inner diameter (m)	1.213	1.000	1.125	1.000	1.000	3.869
Outer diameter (m)	1.668	1.348	1.380	1.443	1.485	3.978
Number of turns / SP coil	474	363	265	461	505	114
Number of SP coils	36×2	2×2	36×2	10×2	34×2	32×2
Gap between turns (mm)	0.36					
Gap between SP coils (mm)	1.0					
Gap between split coils (mm)	111.7	607.6	805.2	1306.6	1460.6	1406.3
Operating current (A)	197.8	257.0	222.2	218.2	213.0	-288.0
Magnetic field @center (T)	9.381					

Table 3. Results of field homogeneity

	Design model	Analysis model	Screening-current model
Magnetic field at center (T)	9.381	9.392	9.381
2 nd order homogeneity (ppm)	-2.399	9.313	125.8
4 th order homogeneity (ppm)	-9.934	-11.04	-41.13
6 th order homogeneity (ppm)	-9.874	-9.723	-10.14
8 th order homogeneity (ppm)	-10.03	-10.07	-9.006
10 th order homogeneity (ppm)	1.640	1.643	1.460

参考文献

1. T. Tosaka, et al: *Abstracts of CSJ Conference*, Vol.92 (2015) 3B-a01.
2. S. Noguchi, et al.; *Abstracts of CSJ Conference*, Vol.91 (2015) 3A-p16
3. H. Ueda, et al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 23 (2013), 4100805.

原型炉用超伝導マグネットの概念設計 – 合同コアチーム報告とスケジュール –

Conceptual design of superconducting magnet system for DEMO reactor

– Introduction of Core-team report and design schedule –

西村 新(核融合科学研究所);

宇藤 裕康、飛田 健次、青木 晃、日渡 良爾、坂本宜照、谷川 尚、原型炉設計合同特別チーム(日本原子力研究開発機構) NISHIMURA Arata (NIFS); UTOH Hiroyasu, TOBITA Kenji, AOKI Akira, HIWATARI Ryoji, SAKAMOTO Yoshiteru, TANIGAWA Hisashi, Joint Special Design Team for Fusion DEMO (JAEA)
E-mail: nishi-a@nifs.ac.jp

1. はじめに

原子力科学技術委員会 核融合研究作業部会は、平成25年7月の第37回会合において、「核融合原型炉開発のための技術基盤構築の中核的役割を担うチーム」(略称:合同コアチーム)を発足させ、核融合原型炉開発の検討を開始した。[1] 合同コアチームは平成26年7月に報告書をまとめ[2]、平成27年1月に原型炉技術基盤構築チャート[3]をまとめた。合同コアチーム報告書は、原型炉の概念、原型炉構成要素の技術課題、原型炉設計のあり方などについて取りまとめている。技術基盤構築チャートは、原型炉設計、および構成要素の検討国目やスケジュール案を示したものである。平成27年3月に核融合科学技術委員会が設立され、その下に平成27年6月に核融合原型炉開発総合戦略タスクフォースが設置された。また、同月、原型炉概念設計を担うチームとして、原型炉設計合同特別チームが組織された。

本報告では、合同コアチーム報告および技術基盤構築チャートを紹介し、提案されているスケジュールについて報告するとともに、その実施体制について述べる。

2. 原型炉技術基盤構築チャート

Fig.1 に超伝導コイルのチャートを示す。2020年頃に中間 Check & Review が設定され、2027年頃までに概念設計を終了する。原型炉工学設計への移行判断を2027年頃に行い、その結果に基づき、工学設計、製造設計へと進むことが想定されている。中間 Check & Review や工学設計移行判断に向けて、Fig.1の左側の欄にあるような項目の検討、まとめが必要であり、特別チームがこれらの実務を担う。検討項目などは総合戦略タスクフォースで議論されており、核融合科学技術委員会での検討を経て、2016年度末には確定する予定である。

2015年度から2016年度にかけて、原型炉用大型超伝導コイル設計の基本方

針を策定するための技術課題検討が実施される。

参考文献

1. 科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会 原子力科学技術委員会 核融合研究作業部会(第37回)配付資料 原型炉開発のための技術基盤構築の中核的役割を担うチームの構築について(案) http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/056/shiryo/attach/1338911.htm
2. 山田弘司他、核融合原型炉開発のための技術基盤構築の中核的役割を担うチーム報告 NIFS-MEMO-69(核融合科学研究所、2014年9月) http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/056/shiryo/1350763.htm http://www.naka.jaea.go.jp/kankoubutu/PDF/goudoukoa_201409.pdf
3. 山田弘司他、核融合原型炉開発のための技術基盤構築の中核的役割を担うチーム報告 – 原型炉技術基盤構築チャート – NIFS-MEMO-72(核融合科学研究所、2015年2月) http://www.naka.jaea.go.jp/kankoubutu/PDF/goudoukoa_201501.pdf

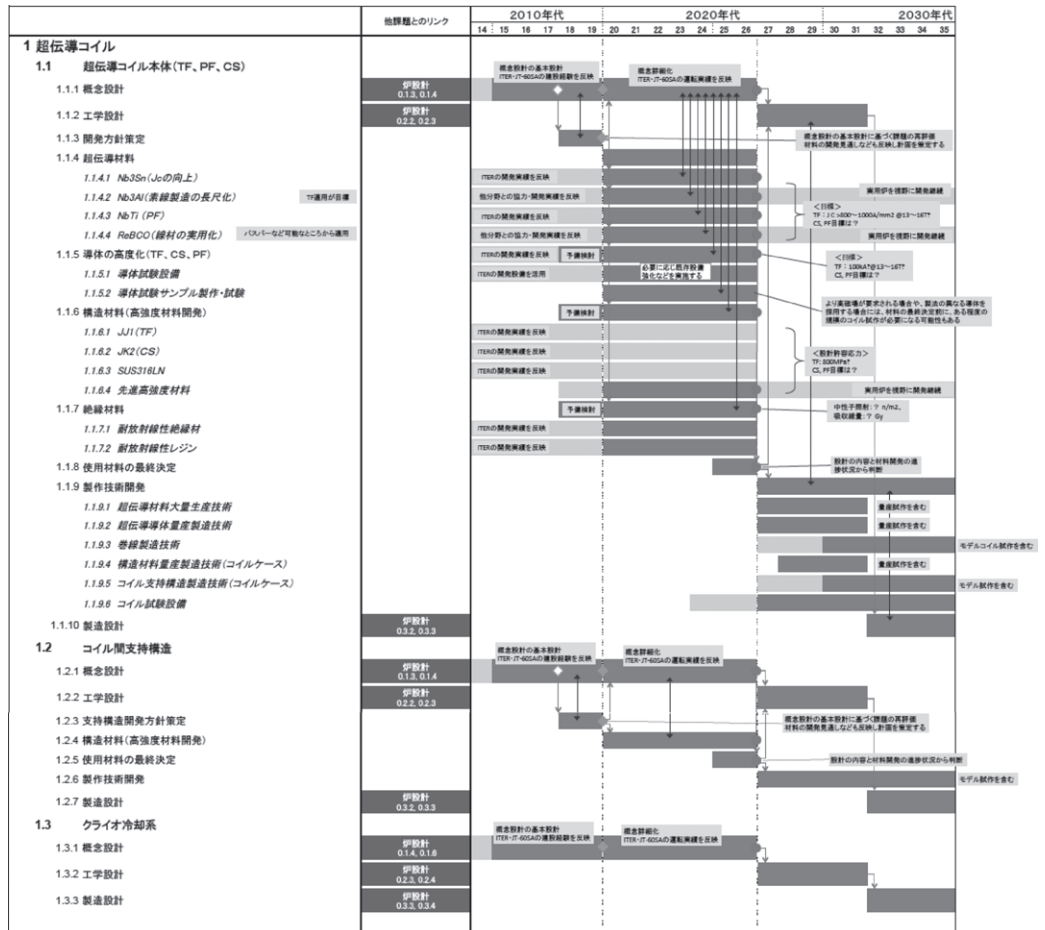


Fig. 1 Chart of establishment of technological bases for DEMO superconducting coils.

原型炉用超伝導マグネットの概念設計 超伝導導体とマグネットの基本仕様

Conceptual design of superconducting magnet system for DEMO reactor - Basic design of superconductor and superconducting magnet -

宇藤裕康, 日渡良爾, 飛田健次, 坂本宜照, 青木晃, 谷川尚(原子力機構); 西村新(核融合研), 原型炉設計合同特別チーム
UTOH Hiroyasu, HIWATARI Ryoji, TOBITA Kenji, SAKAMOTO Yoshiteru, AOKI Akira, TANIGAWA Hisashi (JAEA);
NISHIMURA Arata (NIFS)
E-mail: uto.hiroyasu@jaea.go.jp

1. はじめに

「核融合原型炉開発のための技術基盤構築の中核的役割を担うチーム」の報告書に基づき, 原型炉設計合同特別チームが平成 27 年 6 月に設置され, 原型炉概念の基本設計を開始している。現在, 原型炉設計では技術の確実性を基本指針とし, コミッショニングを考慮して同一装置でパルス/定常の両運転が見込めるようプラズマ電流立ち上げに十分な供給磁束を確保した原型炉の設計点を探索中であり, 設計パラメータの依存性評価と概略パラメータから基本設計方針と重要課題の検討を行っている。本発表ではこれまでに実施した超伝導マグネットシステムの概念設計の概要を報告する。

2. 原型炉用超伝導マグネットシステム

原型炉用超伝導マグネットに関して, ITER から技術的飛躍が最小限となるよう ITER 超伝導マグネット仕様を出発点として検討中である。原型炉の超伝導マグネットシステムは, 16 個のトロイダル磁場(TF)コイル, 6 つのモジュールからなる中心ソレノイド(CS)と 8 個のポロイダル磁場(PF)コイルにより構成される(Fig. 1)。

3. TF コイル

TF コイルは ITER-TF コイルの構成を基本とし超伝導コイル設計コードを用いて設計パラメータを検討している。設計コードを用いたシステム解析では, 供給磁束を十分確保する場合は CS 径の増加に伴い炉全体が大型化(プラズマ大半径 $R_p \sim 8$ m)し, 同じコイル厚では磁気エネルギーの増大に伴う構造材割合の増加によって最大磁場 B_{Tmax} が減少し, 低温鋼の高強度化(耐力の増大)による寄与が大きいことが明らかになった。これらの結果を踏まえ, 原型炉用 TF コイルとして Table 1 に示すような仕様を検討中である。設計応力として 800 MPa を想定し, 超伝導線材は ITER と同様に Nb_3Sn , B_{Tmax} は 13 T 程度である。炉の大型化に伴い磁気エネルギーは ITER の約 4 倍, コイル寸法は ITER の約 1.5 倍となっており, 原型炉に向けた TF コイル開発では特に巻線精度を含めた大型コイルの製作性が課題である。

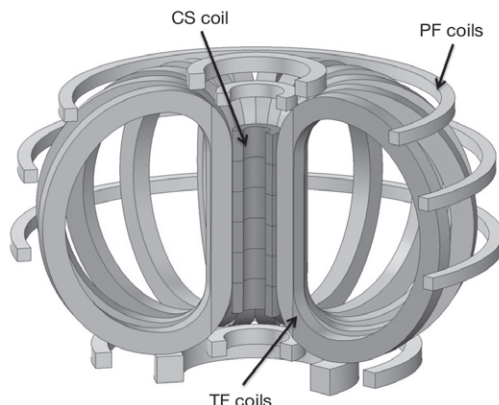


Fig.1 Superconducting magnet system (TFCs, CS, PFCs) for DEMO

Table 1 Main parameters of TF coil for DEMO and ITER

	ITER	DEMO
SC strand	Nb_3Sn	Nb_3Sn
Number of TFC	18	16
B_{Tmax}	11.8 T	13.7 T
Total magneto motive force	164 MAT	230 MAT
Design stress	667 MPa	800 MPa
Number of turns per TFC	134	228
Conductor current	68 kA	63 kA
Inductance per TFC	0.98 H	3.75 H
Total magnetic energy	41 GJ	149 GJ
Overall width	9 m	14 m
Overall height	14 m	20 m
Thickness of TFC	0.9 m	1.7 m
Conductor length per one turn	~35 m	~52 m
Total weight of TFC	5400 ton	11800 ton

4. CS

CS 導体は ITER-CS 導体をベースとしたケーブルインコンジット(CIC)型導体(40 kA, Nb_3Sn)を想定し, 外半径 2 m のパンケーキ型で炉心プラズマの平衡制御を考慮し 6 つのモジュールに分割して配置する(CS 最大磁場 $B_{cs} \sim 13$ T)。応力解析では導体ジャケット(FM316LNH ($\sigma_y = 900$ MPa))トレスカ応力値は許容値以下(500 MPa)となっていることが確認された。

5. PF コイル

PF コイル導体は ITER-PF コイル導体(45 kA, NbTi)をベースとするが, 下部内側 PF コイルのみ経験磁場が大きくなるため CS 導体(40 kA, Nb_3Sn)を用いる設計としている。CS 同様に導体ジャケット(FM316LNH)トレスカ応力値は許容値以下(500 MPa)となっていることが確認されたが, 装置赤道面付近の PF コイルは外径約 40 m の大型コイルであり, 導体流路長を 1 km 以下とするとコイル断面のアスペクト比が増大し保守用ポートと干渉するため, これを避けるための巻線方法(2 条巻パンケーキなど)の再検討が課題である。

6. まとめ

原型炉用超伝導マグネットに関して, ITER から技術的飛躍が最小限となるよう ITER 超伝導マグネット仕様を出発点として模索中である。CS 供給磁束を十分確保する場合は炉が大型化($R_p \sim 8$ m)し, 炉全体のシステム解析では TF コイル最大磁場は 13 T 程度(設計応力 800 MPa), 磁気エネルギー約 150 GJ(ITER の約 4 倍)を構想中であり, 原型炉に向けた超伝導マグネット開発では, ITER 超伝導マグネットと比較して特に大型コイルの製作性が課題と捉えている。

講演では原型炉に向けた超伝導マグネットシステムの課題点と合わせて, 原型炉用大型超伝導コイル設計の基本方針を策定するための技術課題検討を実施する「原型炉超伝導コイルワーキンググループ(2016 年 6 月に最終報告)」の活動についても報告する。

100 kA級高温超伝導STARS導体を用いた ヘリカル型核融合炉FFHR-d1マグネットの設計

Magnet Design for the Helical Fusion Reactor FFHR-d1 with 100-kA HTS STARS Conductor

柳 長門(NIFS); 伊藤 悟(東北大); 寺崎義朗(総研大); 濱口真司, 田村 仁, 三戸利行,
相良明男(NIFS); 橋爪秀利(東北大)

YANAGI Nagato (NIFS); ITO Satoshi (Tohoku Univ.); TERAZAKI Yoshiro (Sokendai);
HAMAGUCHI Shinji, TAMURA Hitoshi, MITO Toshiyuki, SAGARA Akio (NIFS); HASHIZUME Hidetoshi (Tohoku Univ.)

E-mail: yanagi@LHD.nifs.ac.jp

1. はじめに

核融合科学研究所(NIFS)では、ヘリカル型核融合炉の概念設計を進めている。多岐路線として進めている現在の設計オプションのうち、FFHR-d1Aでは超伝導マグネットシステムの磁気エネルギーが~160 GJに及ぶ。小型路線のFFHR-c1では~130 GJである。いずれも3次元形状をしたヘリカルコイル(大半径はd1: 15.6 m, c1: 13.0 m)には、電流容量100 kA級の導体が要求される[1,2]。候補のひとつとして高温超伝導(HTS)導体を検討している。HTS導体は冷却安定性が高く、クエンチリスクを低減できるとともに、巨大なヘリカルコイルを短尺導体の接続によって製作できる利点がある[1-3]。

2. FFHR-d1ヘリカルコイルのHTS導体設計と開発

FFHR-d1のヘリカルコイルに適用することを想定しているHTS導体は、テープ形状のYBCO線材を単純に積層したSTARS(Stacked Tapes Assembled in Rigid Structure)導体である。線材を銅ジャケットとステンレスジャケットの中に収めることで機械的に強固にできることが特長である。銅ジャケットとステンレスジャケットの間に電気絶縁を設け、ステンレスジャケットの外側は隣接する導体と溶接で連結する[2]。この導体をヘリカル1ピッチ分(~30 m)ずつ順次接続することで巻線を行う構想である。コイル設計と並行してNIFSと東北大学・量子エネルギー工学専攻との共同研究により、100 kA級導体サンプルの試作と試験も行っている[2, 3]。試作導体ではフジクラ製GdBCO線材(幅10 mm、臨界電流~600 A@77 K, s.f.)を54枚積層して銅ジャケットに収め、ステンレスジャケットをボルト締めで覆い、FRPによる断熱を施した。サンプルはレーストラック形状で、直線部の片側に東北大学で開発された機械的ブリッジジョイントを入れることで1ターンループを形成し、外部磁場を変化させて電流を誘起した。温度20 K、磁場5.3 Tにおいて電流100 kAを達成するとともに、温度4.2 Kでは電流100 kAを1時間保持することに成功した[2]。1 kA/sの高速励磁においても早期クエンチを起こすことなく臨界電流まで到達可能であることを電圧計測と数値解析により確認した[3]。また、接続部は1.8 nΩの低抵抗を実現した[4]。

3. クエンチ保護と冷却

HTS STARS導体を用いたヘリカル巻線構造について検討し、緊急遮断の時定数、発生電圧、導体のホットスポット温度を評価している。現在の簡易検討において、遮断時定数30秒の場合にホットスポット温度が<150 Kに抑えられると概算している。ここで、巻線にはダブルパンケーキ方式を採用し、1コイルにつき15分割とすることで、発生電圧を~3 kVに抑えることが可能である。

巻線導体の冷却にはヘリウムガスを用いることを検討している。ヘリカルコイルにおいて主な発熱源は中性子照射による核発熱であり、トーラス内側で厳しく、最大~500 W/m³となる。(外側では最大~100 W/m³。)これに、導体接続部のジュール発熱が加算される。導体の四隅に丸みをもたせることで長手方向の冷却チャンネルを設けることを考えている(Fig. 1)。導

体表面には一定間隔で溝を掘り、断面方向の冷却チャンネルとする。この構造は、現在の大型ヘリカル装置LHDのヘリカルコイルの巻線に準じた発想である[5]。長手方向チャンネルは一つあたりの等価直径が~8.4 mmであり、ヘリカルコイルの下部を冷媒入口、上部を出口とすると、トーラス内側を通るパスは長さ~18 mとなる。この部分で最大~25 Wの発熱を取り去る必要があり、入口の温度10 K、圧力200 kPa、出口温度20 Kとすると、必要流量は~0.5 g/sであり、圧力損失は~1.4 kPaと概算できる。この場合、二条のヘリカルコイルの全流量は~4 kg/sとなる。非一様発熱分布を伴う並列流路のガス冷却について、今後、数値計算による詳細解析を行う計画である。

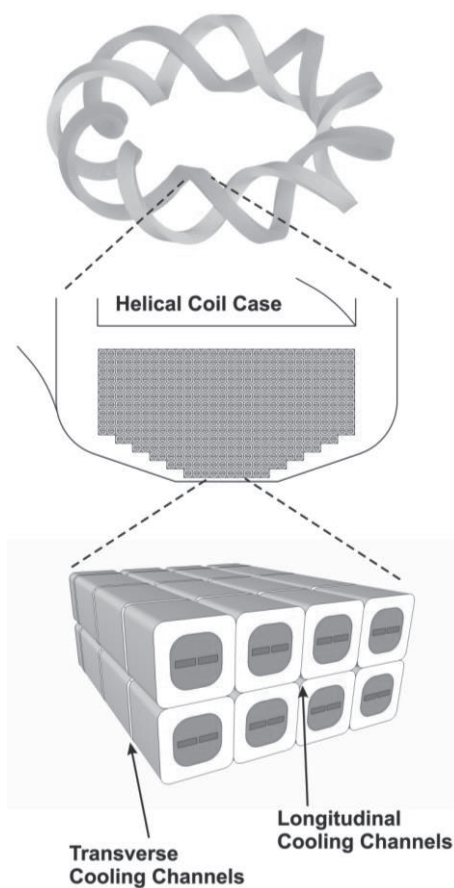


Fig.1 Schematic illustration of the FFHR-d1 helical coils with windings consisting of HTS STARS conductors. Cooling channels for helium gas are formed by conductor corners.

参考文献

- [1] A. Sagara et al., Fusion Eng. Des. **89** (2014) 2114.
- [2] N. Yanagi et al.: Nucl. Fusion **55** (2015) 053021.
- [3] Y. Terazaki et al.: IEEE Trans. Appl. SC. **24** (2014) 4801305.
- [4] S. Ito et al.: IEEE Trans. Appl. SC. **25** (2014) 4201205.
- [5] S. Imagawa et al.: Fusion Eng. Des. **41** (1998) 253.

リアクト・アンド・wind法によるヘリカルコイル巻線の概念検討

A conceptual design of helical winding with the react-and-wind method.

今川 信作 (NIFS)

IMAGAWA Shinsaku (NIFS)

E-mail: imagawa@LHD.nifs.ac.jp

1. はじめに

ヘリオトロン型核融合炉のヘリカルコイルに Nb₃Sn ケーブル・イン・コンジット(CIC)導体の採用を検討している。CIC 導体は超伝導線と銅線を多重に撚り合わせたケーブルをコンジットに収納したものであることから、ケーブルの最終撚り方向と同じ方向にコンジットを振ることによって超伝導線に張力が働く。一方、超伝導線は、コンジットとの熱膨張係数の違いにより 0.7%程度の圧縮ひずみが生じて臨界電流が大きく低下した状態で使用されることから、熱処理後に導体に振りを加えると圧縮ひずみの緩和により臨界電流の回復が期待できる。そこで、円筒ボビンで CIC 導体の熱処理を行った後、図1に示すようにバネを引き伸ばすように導体に振りを加えながらヘリカル形状に巻線する「リアクト・アンド・wind法」の適用可能性を検討している。

2. ヘリカルコイル巻線の概念

全長が 150 m 程度のヘリカルコイルに用いる CIC 導体の冷却流路長を 500 m 以内とするため、5条のレイヤー巻を提案している[1]。バネを伸ばすように巻線する場合、コンジットに生じる撓りひずみは撓り角と半径に比例し、図2に示すように最大で 0.6%程度になる。純せん断の場合、導体長手方向の引張・圧縮ひずみは 0 で、45° の方向に最大の引張・圧縮ひずみが生じる。超伝導線は撓られているため、導体長手方向に対して傾いている分の引張・圧縮ひずみが生じることになり、10° 程度の傾きの超伝導線に働く引張・圧縮ひずみは、半径の差も考慮すると最大で 0.15%と評価される。一方、曲げについては、平均曲げ半径で熱処理を行うことにより、追加の曲げひずみは 0.05%以下に収まる。

3. 導体撓り実験

コンジットを振る場合に撓線に働く引張・圧縮ひずみを調べるため、図3に示すようなCIC模擬導体を製作した。2本の銅線の長手中央付近にひずみゲージを貼り付け、リード線と2本の導線を撚り合わせて1つの一次撓線を製作し、三次撓線に組み込んだ。コンジット材にはステンレス配管を使用し、コンジット端部には振りを加えるためのフランジを取り付け、端部では撓線を樹脂で埋めてジャケットに固定した。撓線挿入後の縮径を実施できなかったため、ポイド率は50%程度と大きくなっている。模擬導体を振る場合に撓線に働くひずみとコンジットの45° 方向のひずみの関係を図4に示す。撓り方向と同じ方向にコンジットを振ると撓線に引張ひずみが生じ、反対方向に振ると圧縮ひずみが生じることは予想通りであったが、そのひずみはコンジットの主ひずみの1/20程度に緩和される結果となった。ヒステリシスループを描くことから、コンジットに対して撓線が滑っていると推測される。

4. 今後の計画

撓り方向と同じ方向にCIC導体を振ることにより撓線に引張ひずみが生じることを確認できたので、導体を振ることによってNb₃Sn線の臨界電流を向上させる実証実験の準備を進めている。Nb₃Sn線と銅線を撚り合わせた縮小CIC導体を製作し、バネ形状に巻線してから熱処理を行い、バネの長さを変えることにより振りを加える方法を計画している。

謝辞

本研究は、科学研究費補助金(基盤研究(C), 課題番号: 15K06654)の助成を受けて実施された。

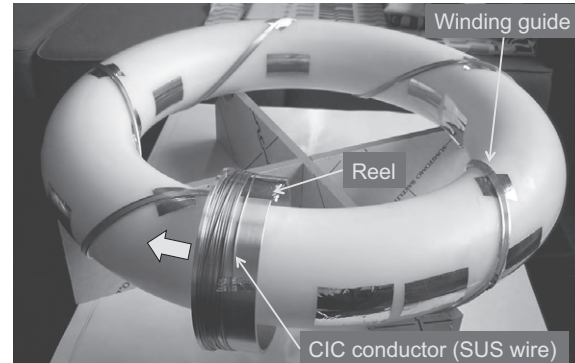


Fig. 1. Mockup for winding a helical coil with CIC conductors.

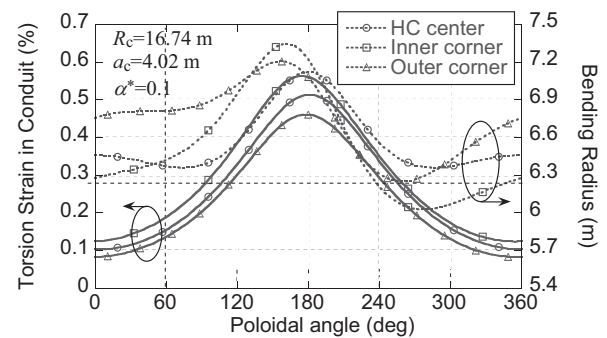


Fig. 2. Torsion strain and bending radius of the helical coil of FFHR2m2b for the conductor radius of 0.021 m [1].

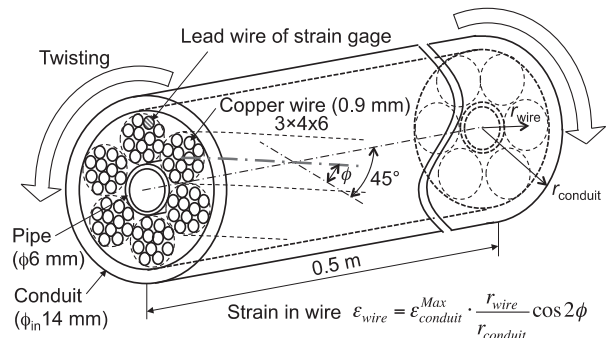


Fig. 3. CIC conductor sample for twisting tests.

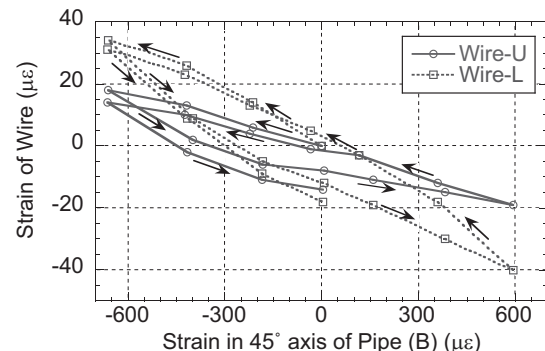


Fig. 4. Strain of the wires versus the strain of the conduit.

参考文献

1. S. Imagawa et al.: Plasma Fusion Res. Vol. 3 (2008) S1050.

分割型高温超伝導マグネットの接合性能の分析／改善法の研究進展

(1) 接合抵抗の磁場方向依存性評価

Research progress in methods to analyze and improve joint performance for a remountable high-temperature superconducting magnet

(1) Evaluation of magnetic field orientation dependence of joint resistance

伊藤 悟, 清野 祐太郎, 西尾 樹, 小黒 英俊, 橋爪 秀利(東北大)

ITO Satoshi, SEINO Yutaro, NISHIO Tatsuki, OGURO Hidetoshi, HASHIZUME Hidetoshi (Tohoku Univ.)

E-mail: satoshi.ito@qse.tohoku.ac.jp

1. はじめに

核融合炉の超伝導マグネットを分割し、機械的接合法で組み立てて製作する分割型高温超伝導マグネットを提案している[1]。接合部設計のためには、接合抵抗の接合構造／運転条件(温度・磁場)依存性を評価・分析する必要がある。過去の研究[2]において、REBCO テープ線材の機械的ラップジョイント(接合面にインジウム箔を挿入)の接合抵抗の温度・磁場(REBCO テープ線材面に垂直方向)依存性を評価し、線材銅面とインジウム箔の界面抵抗(接触抵抗)のモデル式の提案を行ってきた。本講演では、過去の研究で未評価であった接合抵抗の磁場方向／線材構造依存性を新たに評価・分析した結果について報告する。

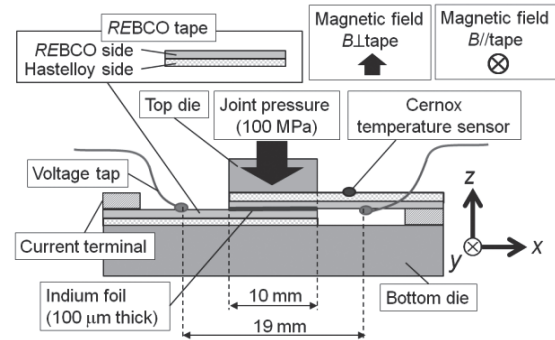


Fig. 1 Experimental set-up.

2. 実験方法

Fig. 1 に実験体系を示す。接合抵抗の線材構造依存性を評価するために REBCO テープ線材としてはフジクラ社の FYSC-SC05(銅層付き, 5 mm 幅, $I_c=260$ A at 77 K, s.f.), Superpower 社の SCS4050-AP(銅層付き, 4 mm 幅, $I_c=100$ A at 77 K, s.f.) の 2 種類を用意した。これら線材の銅層面(接合面)を#400 の研磨紙で研磨し、エタノールで洗浄した後、インジウム箔(100 μm 厚)を挿入して接触圧力 100 MPa で接合し、機械的ラップジョイントの実験サンプルとした。実験サンプルは GM 冷凍機付のクライオスタットに設置し、ヒータにより温度調整を行った。また REBCO テープ線材面に垂直／平行方向に磁場を印加して、接合抵抗を評価した。

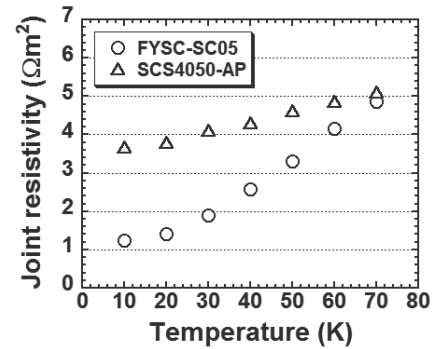


Fig. 2 Joint resistivity as a function of temperature at 0 T.

3. 結果と考察

Fig. 2 にゼロ磁場における接合抵抗率(接合抵抗と接合面積の積)の温度依存性を示す。FYSC-SC05 と SCS4050-AP で 70 K での接合抵抗率が同じ機械的ラップジョイントサンプルを比較した場合、FYSC-SC05 のほうが温度低下による接合抵抗率低下の度合いが大きくなった。両者の構造の違いは FYSC-SC05 の銅層が銀層の上にスズではんだ付けされているのに対して、SCS4050-AP の銅層が銀層の上に電解メッキで形成されていることにあり、銀層と銅層の界面抵抗の違いが結果に影響を与えていると考えられる。

Fig. 3 に FYSC-SC05 の機械的ラップジョイントの 10 K および 30 K における接合抵抗率の磁場依存性を示す。磁場の上昇とともに接合抵抗が上昇するのは、接合部の構成材料の抵抗、界面抵抗(界面を形成している材料の抵抗に依存)に磁気抵抗が現れるためである。また、磁場方向がテープ線材面に平行である場合、接合部での電流ベクトルの向きと垂直になるため、磁気抵抗の影響が大きくなる。特に 15 K 以下においては、磁場の上昇とともに接合抵抗率が大きく上昇した。接合部を形成する各材料の抵抗、界面抵抗の磁場依存性を評価したところ、磁場上昇にともなう接合抵抗率の大きな上昇は、銅とインジウムの界面抵抗(接触抵抗)、特にインジウム表面の酸化層による皮膜抵抗に起因している可能性が高いことがわかった。今後は皮膜抵抗が大きく異なるサンプルを複数用いて、接合抵抗の磁場依存性の詳細評価を行う予定である。

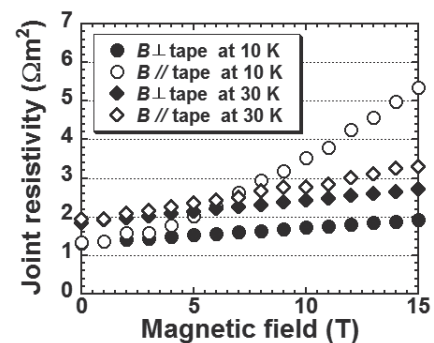


Fig. 3 Joint resistivity as a function of magnetic field at 10 K and 30 K for FYSC-SC05.

謝辞

本実験は、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にて実施されました。

参考文献

- H. Hashizume et al.: J. Plasma Fusion Res. SERIES, Vol. 5 (2002) pp. 532-536
- Y. Seino et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 25 (2015) Art. ID 6603405

分割型高温超伝導マグネットの接合性能の分析/改善法の研究進展

(2) 接合部製作時の温度制御による接合抵抗低減

Research progress in methods to analyze and improve joint performance for a remountable high-temperature superconducting magnet

(2) Reduction of joint resistance by temperature control during fabrication of a joint

西尾 樹, 伊藤 悟, 橋爪 秀利 (東北大学)

NISHIO Tatsuki, ITO Satoshi, HASHIZUME Hidetoshi (Tohoku Univ.)

E-mail: tnishi@karma.qse.tohoku.ac.jp

1. 諸言

核融合炉マグネットを分割製造, 機械的接合によって製作する分割型高温超伝導マグネット[1]が提案されており, 接合部の電気抵抗 (接合抵抗) の低減が課題となっている。先行研究ではREBCO系超伝導線材の接合面間にインジウム箔を挿入して接合するブリッジ式機械的ラップジョイントにより接合抵抗が冷却電力の観点で許容値となることが示された[2]。またインジウムの硬度低下によるインジウム層の薄化と真実接触面積の増大の効果を期待して, 接合部製作時に加熱処理を行った結果, 加熱処理温度 90 °Cとしたときに, 接合抵抗を加熱処理前の接合抵抗値の 60%程度まで低減することに成功した[3]。しかしながら, 接合抵抗変化の要因の一つとされるインジウム層の厚さ減少量は高温域で想定よりも小さい値となった。これは上記製作手法において接触圧力を制御していなかったため, 加熱処理中に接触圧力が低下しているためであると考えられる。これは真実接触面積低下の要因ともされ, 加熱処理中に一定接触圧力を付加することは接合抵抗低減のために有効な手段と考えられる。そこで本研究ではさらなる接合抵抗低減のために, 接触圧力制御が可能な実験体系を用いて, 一定の接触圧力下で加熱処理を行ったサンプルの接合抵抗を評価した。

2. 加熱処理実験

実験サンプルにはREBCO系高温超伝導線材の一種であるGdBCO線材 (フジクラFY-SC05, $I_c=260$ A @77 K, 自己磁場) の機械的ラップジョイントを用いた。接合面はサンドペーパー (平均研磨粒子径81 μ m) で研磨し, 線材接合時にはインジウム箔 (厚さ100 μ m) を挿入した。また接合面積は50 mm² とした。まずFig. 1に示す体系で接触圧力100 MPa付加し, 液体窒素冷却下で加熱処理前の接合抵抗を測定した。続いて, 接触圧力100 MPaを付加しながら, 実験サンプルの加熱処理を行った。加熱処理温度は50, 75, 90, 110, 160 °Cとし, 加熱処理時間は30分とした。最後に加熱処理後の接合抵抗を測定し, 加熱処理による接合抵抗変化を評価した。

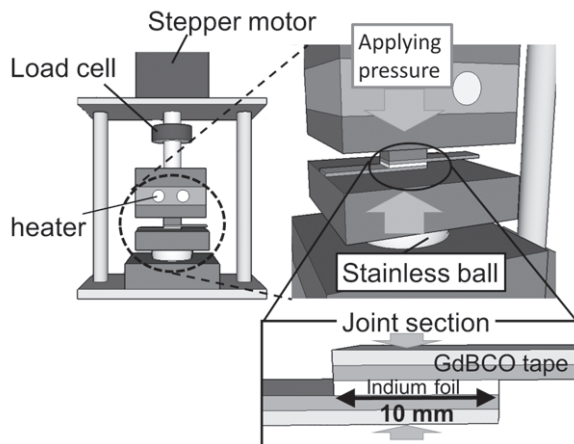


Fig. 1 Experimental set-up

3. 結果と考察

加熱処理温度と接合抵抗について Fig. 2 に文献 3 の結果 (加熱処理前に 100 MPa を付加し加熱処理中に接触圧力制御を行わなかった場合) と今回の結果 (加熱処理中に一定の接触圧力 100 MPa を付加した場合) を示す。一定の接触圧力を付加した場合には加熱処理前に接触圧力を付加したのみに比べて, 加熱処理温度を 75 °C以上とした場合において特に接合抵抗率 (接合抵抗と接合面積の積) が小さくなった。また, 一定の接触圧力を付加した場合, 加熱処理温度 90 °Cにおいて, 接合抵抗率が加熱処理前の接合抵抗率の 50 %程度まで低減した。加熱処理による接合抵抗変化の要因をインジウム層の厚さに依存するインジウム層抵抗と真実接触面積に依存する接触抵抗の 2 要素から考察した結果, 一定の接触圧力を付加した場合, 2 要素ともに特に加熱処理温度が高い際に大きくなった。

実際に大型導体の接合部の加熱処理を行う場合, 正確な温度制御は難しいと考えられる。すなわち, ある温度範囲を考慮しての加熱処理が必要であり, 加熱処理温度が 90 °Cを超えるような場合でも低接合抵抗の実現が可能な本手法は, 大型導体の接合部の加熱処理にも適していると考えられる。

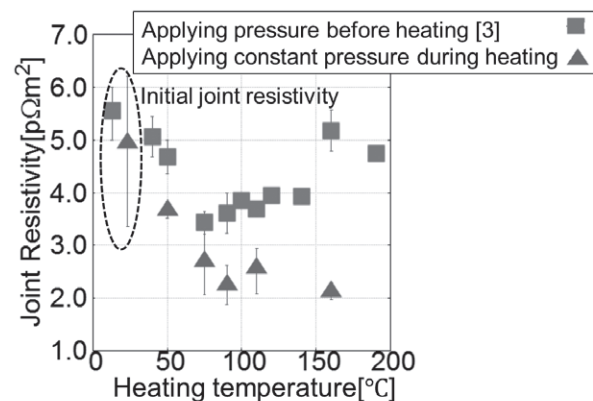


Fig. 2 Joint resistivity as a function of heating temperature

4. 結言

本研究では高温超伝導線材の機械的接合において, 接合部製作時の加熱処理の際に一定の接触圧力を付加することでインジウム層の薄化, 真実接触面積の増加の効果が大きくなることを確認した。今後は加熱処理手法を最適化し, 多層多列体系へ適用する予定である。

参考文献

1. H. Hashizume, et al.: J. Plasma Fusion Res. SERIES, Vol. 5 (2002) pp. 532-536
2. S. Ito, et al.: Plasma Fusion Res., Vol. 9 (2014) Art. ID 3405086
3. N. Nishio, et al., MT24, Oct. 18-23, 2015, Seoul, Korea

分割型高温超伝導マグネットの接合性能の分析/改善法の研究進展

(3) 室温における接合部の電磁非破壊検査の基礎研究

Research progress in method to analyze and improve joint performance for a remountable high-temperature superconducting magnet

(3) Fundamental study on electromagnetic nondestructive testing of joint section at room temperature

陳 偉熙, 伊藤 悟, 遊佐 訓孝, 橋爪 秀利(東北大学)
 CHEN Weixi, ITO Satoshi, YUSA Noritaka, HASHIZUME Hidetoshi
 E-mail: wchen@karma.qse.tohoku.ac.jp

1. 研究背景

核融合炉の超伝導マグネットをセグメントごとに分割して製造を行う分割型高温超伝導マグネットが提案されている[1]。当該概念においては接合部における電気抵抗(接合抵抗)の抑制が大きな課題であるが、これまでの研究結果よりこの接合抵抗による発熱が想定のマグネット冷却能力を下回る範囲で 100 kA 級の大型導体の作製に成功した[2]。しかしながらその一方、接合抵抗の完全な制御は現状困難であり、核融合炉への適用のためには、冷却通電前に接合抵抗を予測・評価する技術が必要不可欠であると言える。

このような観点に立ち、以前の研究においては常温時に測定された接合部の電気インピーダンスから冷却時の接合抵抗を予測する試みについて検討を行った[3]。得られた試験結果は電気インピーダンス測定による接合抵抗の予測可能性を強く示唆するものであった。

そこで本研究においてはより低い抵抗値を定量的に測定可能な体系を構築し、接合抵抗の異なる試験体の電気インピーダンス測定を行うことによって、電気インピーダンスのレジスタンス及びリアクタンス成分と接合抵抗の相関についてより詳細な検討を行った。

2. 実験内容

本実験で用いる試験体の概略図および測定体系を Fig.1 に示す。試験体は幅 5 mm の GdBCO 高温超伝導テープ(フジクラ社製 FYSC-SC05)2 枚を使用し、テープの銅層面を向かい合わせにしてインジウムを挟み込み圧力を加えることで接合する、機械的ラップジョイント方式で作製した。インジウムの厚さは 100 μm であり、加圧は経験上最適な値(100 MPa)となるように常温で調整した。今回の測定では以上の方法で作製した試験体 6 個に加え、接合抵抗を意図的に増大させた試験体 3 個(5 MPa 以下の圧力で接合)を準備した。区別をするために、100 MPa で加圧を行った試験体をグループ A、5 MPa 以下で加圧を行った試験体をグループ B とした。

接合抵抗は液体窒素冷却下で、電気インピーダンスは常温で、いずれも四端子法により測定を行った。常温における電気インピーダンスは接合部に流れる電流と接合部の電圧をロックインアンプ(NF 回路設計ブロック社製 LI5640)を用いて測定することによって行った。測定に用いた周波数は 20 Hz ~ 100 kHz の間の 12 周波数である。

3. 結果・考察

測定を行った試験体のうち、接合抵抗が最も小さい(0.19 $\mu\Omega$)試験体の電気インピーダンスの測定結果を Fig.2 に示す。レジスタンスがほぼ一定であること、リアクタンスが周波数にほぼ比例して増大していることから、今回用いた周波数帯では当該部は抵抗とインダクタンスを直列接続したものとしてモデル化されうものと考えられる。

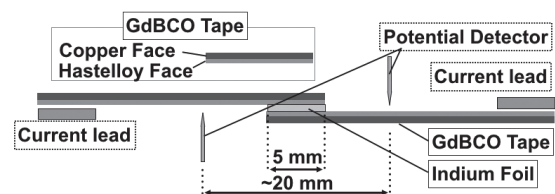


Fig.1 Composition of measurement for normal sample

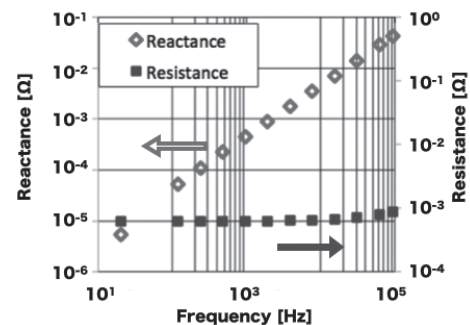


Fig.2 Result of impedance measurement

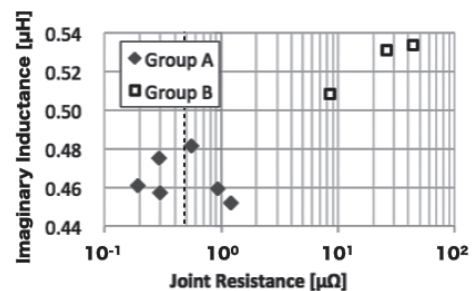


Fig.3 Comparison of imaginary inductance

各試験体のインダクタンスの値と接合抵抗の値の関係を Fig.3 に示す。仮想インダクタンスは電気インピーダンス測定の結果得られたリアクタンスの値を周波数の一次関数として最小二乗法により近似的に算出したものである。図より、冷却時の接合抵抗が大きいほど仮想インダクタンスが大きいことを確認することができる(相関係数: 0.74)。より詳細な分析結果は当日報告する。

参考文献

- H. Hashizume, et al.: J Plasma Fusion Res, SERIES.5, (2002), 532-536
- S. Ito, et al.: J. Plasma Fusion Res, Vol 9, 3405096(2014)
- W. Chen, et al.: eNDE2015, Sep. 21-23, 2015, Sendai, Japan

加速用 HTS マグネットの開発(4-1)

-SuperKEKB 衝突点色収差補正用 HTS 六極マグネットの設計-

Development of HTS Accelerator magnet (4-1)

- Design of a chromaticity correction HTS sextupole for SuperKEKB interaction region -

土屋 清澄, 多和田 正文, 増澤 美佳, 寺島 昭男, 大内 徳人, 菅野 未知央, 王 旭東, 有本 靖, 宗 占国(KEK);
菊池 章弘 (NIMS); 藤田 真司, 大保 雅哉, 飯島 康祐 (フジクラ)

TSUCHIYA Kiyosumi, TAWADA Masafumi, MASUZAWA Mika, TERASHIMA Akio, OHUCHI Norihito, SUGANO Michinaka,
WANG Xudong, ARIMOTO Yasushi, ZONG Zhanguo (KEK); KIKUCHI Akihiro (NIMS); FUJITA Shinji, DAIBO Masanori,
IIJIMA Yasuhiro (Fujikura)
E-mail: kiyosumi.tsuchiya@kek.jp

1. はじめに

現在建設が進められている SuperKEKB は KEKB の40倍のルミノシティーを目指す電子-陽電子衝突型加速器である。この高ルミノシティーを達成するためには衝突ビームのキメ細かな色収差(運動量によるビームサイズの分散)補正が必要で、このための特殊な六極マグネット(ノーマルとスキューの六極磁場を同時に発生する)が必要となる。この特殊なマグネットは鉄ヨークを使った常伝導マグネットでは製作出来ず、電流で磁場を作る超伝導マグネットでのみ製作可能である。また、この特殊マグネット16台は衝突点から 30 m 程離れたところから 100 m くらいの領域に渡って分散して設置される小型マグネットであるため大型ヘリウム冷凍機から冷媒を分配する方式は効率的ではなく、小型冷凍機冷却のマグネットが望ましく思われる。然しながら、加速器の要素として使用される超伝導マグネットではビームによるクエンチの可能性があり、クエンチ後の復帰時間の長さは積分ルミノシティーの低下をもたらす。この問題を解決するものとして小型冷凍機冷却の高温超伝導マグネットが考えられ、その可能性の検討を始めた。本稿ではこの特殊六極マグネットの設計について報告する。

2. 特殊六極磁石の設計

マグネット設計では幅 4.1mm, 厚さ \sim 0.2 mm で、外周に 20 μ m 厚の安定化銅をメッキした ReBCO 線材を想定した。絶縁は 25 μ m のポリイミドテープを2重巻きとした。2次元断面設計では1)出来るだけ単純なレーストラック型コイルとする、2)要求磁場勾配を考慮してノーマルコイルを内側に、スキューコイルを外側にする、3)コイルの外側には鉄ヨークを配置し、外部への漏れ磁場を小さくする、4)運転電流は \sim 300 A 以下とする など を考慮し、多極磁場成分(a_n, b_n)を 10^{-4} オーダーに抑えるコイル形状、配置を求めた。設計したマグネットの断面図を Fig. 1 に、また、主要パラメータを Table1に示す。

実際にマグネットを製作する場合、設計通りの寸法にコイルを製作したり、組立てたりすることは不可能である。ある程度の誤差を想定しなければならない。その目安を得るため、コイルの寸法、位置を設計値の周囲でランダムに変化させた場合の多極磁場の標準偏差の検討を行った。その結果の一例を Fig. 2 に示す。この検討から多極磁場成分を 10^{-4} オーダーに抑えるためには、コイルの寸法・位置の設計値からのずれは 50 μ m 程度に抑えることが望ましいこと、また、高次($n > 5$)の多極成分はあまり問題にはならないことなどが分かった。

3. まとめ

SuperKEKB で必要となる特殊六極マグネットの概略設計を行った。コイルは ReBCO テープ線材を用いたレーストラック型コイルで要求磁場精度を考慮した設計を行った。今後は、このコイル試作を進め、クエンチ保護や発生磁場の観点からコイルの特性測定を行い、ReBCO 線材を用いたコイルが加速器用マグネットのコイルとなり得るかを調べて行く予定である。

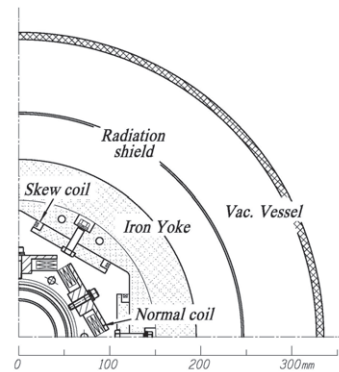


Fig. 1 Cross-section of the R&D sextupole magnet

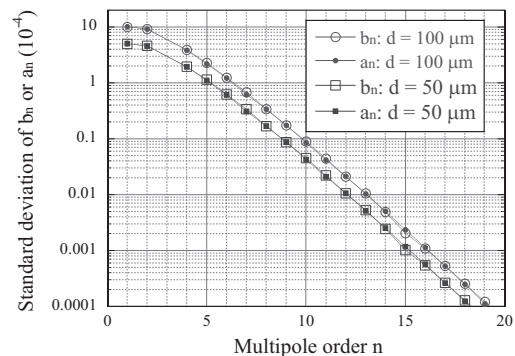


Fig. 2 Standard deviation of the normal and skew harmonics a_n and b_n of the normal sextupole coils with random displacements of 50 or 100 μ m.

Table 1 Design parameters of R&D Sextupole Magnet

Parameter	Value
Bore radius	40 mm
Coil length	200 mm
Yoke radius(inner, outer), length	160, 200 mm, 200 mm
Normal sextupole	
Coil width (inner, outer), height	38.4, 84.0 mm, 9.0 mm
Number of turns	112 x 2 turns
Operating current	257.6 A
Max B// on the conductor	2.27 T
Max B \perp on the conductor	1.30 T
Stored energy	2.1 kJ
Skew sextupole	
Coil width (inner, outer), height	76.6, 94.0 mm, 4.5 mm
Number of turns	43 turns
Operating current	259.5 A
Max B// on the conductor	0.71 T
Max B \perp on the conductor	0.60 T
Stored energy	0.13 kJ

謝辞

本研究は科学研究費補助金(15H03667)の助成により実施したものである。

加速器用 HTS マグネットの開発(4-2)

—REBCO 含浸コイルのクエンチ特性の測定—

Development of HTS Accelerator magnet (4-2)

— Measurement of the quench characteristics of REBCO impregnated coils —

藤田 真司, 武藤 翔吾, 大保 雅哉, 飯島 康裕 (フジクラ); 土屋 清澄, 大内 徳人 (KEK)
 FUJITA Shinji, MUTO Shogo, DAIBO Masanori, IJIMA Yasuhiro (FUJIKURA);
 TSUCHIYA Kiyosumi, OHUCHI Norihito (KEK)
 E-mail: shinji.fujita@jp.fujikura.com

1. はじめに

現在建設が進められている SuperKEKB において、色収差補正用の HTS 六極マグネットが検討されており、HTS 導体として REBCO テープ線材が想定されている。REBCO テープ線材は金属系超電導線材に比べ常電導伝播速度が遅く、クエンチ時に局所的な発熱を生じて線材が損傷してしまうことが懸念されるため、クエンチ検出・保護法の開発が不可欠である。これまで安定化銅 75 μ m 厚の線材を用いた小型含浸コイルでクエンチ時の挙動の調査を行ってきた[1,2]が、今回異なる安定化銅厚を有する REBCO 線材を用いて小型含浸コイルを製作し、クエンチ時の挙動を調査した。

2. 実験方法

作製した実験用コイルの諸元を Table 1 に示す。コイルに使用した REBCO テープ線材はフジクラ製 5mm 幅、75 μ m 基板、全周 20 μ m 厚 Cu めっき線材である。コイルは 2 層のパンケーキコイルであり、エポキシ樹脂で真空含浸している。コイルの片側のパンケーキコイル(コイル 1 層目)には Fig. 1 に示すように 1 ターン目に NiCr 箔によるヒーター (~0.5 Ω @50 K)、1~3 ターンのヒーター付近に数 cm 間隔で電圧タップを取り付けている。コイルは GM 冷凍機による伝導冷却で 50~20K に冷却し、各温度でコイル I_c の 30~60 % の負荷率の電流 (I_{op}) を通電した状態でヒーターに 2A の電流を通電しコイル 1 層目をクエンチさせ、コイル 1 層目と 2 層目のバランス電圧によりクエンチを検出し電流を遮断した。

3. 実験結果

クエンチ検出電圧 V_{QD} を 40~100 mV、クエンチ検出時間 t_{QD} を 10 ~100 msec に変化させてホットスポット(ヒーター部; V56)の最大到達電圧を測定し、予め測定した線材抵抗値の温度依存性よりホットスポット最大到達温度 T_{max} を見積った。Fig. 2 にいくつかのクエンチ検出条件 (V_{QD} , t_{QD}) での T_{max} の I_{op} 依存性を示す。Fig. 2 ではコイル温度 20~50 K のすべてのデータをプロットしているが、同じクエンチ検出条件では T_{max} はコイル温度には依存せず、 I_{op} に依存することが分かる。 t_{QD} が短ければ T_{max} は I_{op} の増加に伴い減少する傾向があるが、 t_{QD} が長くなると I_{op} と共に増加する傾向がある。今回の実験では V_{QD} = 100 mV、 t_{QD} = 100msec の時に最大で 250 K まで上昇したが、試験前後で LN₂ 中でのコイル特性を比較し、劣化がないことを確認した。

常電導伝播速度 (NZPV) はホットスポット周辺の電圧タップで観測される電圧の時間差から算出した。電圧の閾値は 2 mV とした。NZPV は I_{op} の増加と共に直線的に増加し、20~70 mm/sec 程度の結果となった。この I_{op} に対する傾向は 75 μ m Cu ラミネート線材のコイルの場合と同じであるが、NZPV の値自体は 75 μ m Cu の場合 (5~25 mm/sec 程度) に比べて 2 倍以上速い。

当日はさらに Cu 厚の異なるコイルの試験結果および比較についても報告する予定である。

Table 1 Specifications of test coil.

Tape width (with insulation)	5.06 mm
Tape thickness (with insulation)	0.182 mm
Inner diameter	50 mm
Outer diameter	69.7 mm
Height	11.7
Turns	50 \times 2
Tape Length	10 m \times 2
Coil I_c @77K, s.f. (10^{-7} V/cm)	101.1 A
Coil n @77K, s.f.	30.8

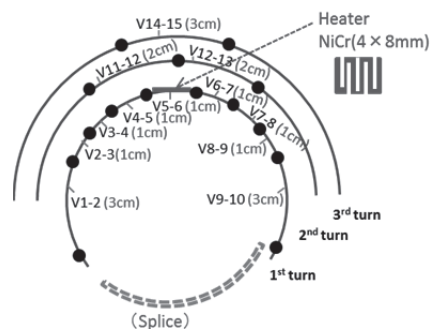


Fig.1 Location of a heater and voltage taps.

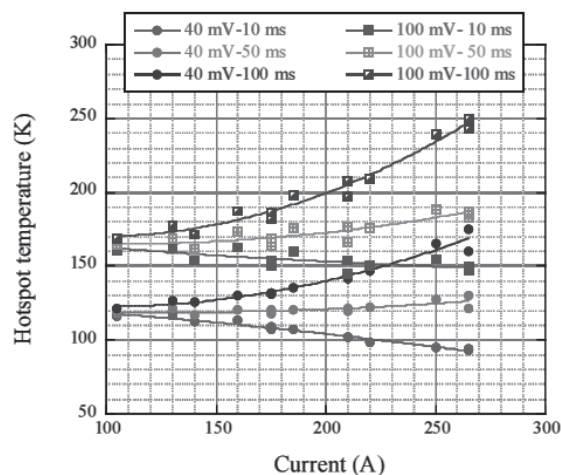


Fig.2. The hotspot temperature of the coil after quenching for certain detection conditions.

謝辞

本研究は科学研究費補助金 (15H03667) の助成により実施したものである。

参考文献

1. S.Fujita et al., Abstracts of CSJ Conference, Vol. 89 (2014) p.143
2. M.Daibo et al., Physics Procedia, 67 (2015) 750 - 755

加速用 HTS マグネットの開発(4-3)

- REBCO 含浸コイルのクエンチ特性の数値解析 -

Development of HTS accelerator magnet (4-3)

- Numerical analysis on quench characteristics of REBCO impregnated coil -

王 旭東, 土屋 清澄 (KEK); 藤田 真司, 大保 雅載, 飯島 康裕 (フジクラ)

WANG Xudong, TSUCHIYA Kiyosumi (KEK); FUJITA Shinji, DAIBO Masanori, IJIMA Yasuhiro (Fujikura)

E-mail: wanxdon@post.kek.jp

1. はじめに

現在建設が進められている SuperKEKB は KEKB の40倍のルミノシティーを目指す電子-陽電子衝突型加速器である。この高ルミノシティーを達成するためには衝突ビームのキメ細かな色収差(運動量によるビームサイズの分散)補正が必要で、このための特殊な六極マグネット(ノーマルとスキューの六極磁場を同時に発生する)が必要となる。この六極マグネットは鉄ヨークを使った常伝導マグネットでは製作出来ず、加速器リング広域に渡って分散して設置されるため、小型冷凍機冷却の超伝導マグネットが望ましく思われる。そこで、我々は小型冷凍機冷却の高温超伝導六極マグネットの実現可能性について検討を始めた[1]。高温超伝導六極マグネットの実現のためには、そのクエンチ検出・保護法の開発が不可欠である。本報では、REBCO 含浸コイルのクエンチ特性の測定結果に併せて数値解析評価を行ったので報告する。

2. 解析モデル

解析対象の実験コイルは前頁の予稿にあるように2層のパンケーキコイルである[2]。実験結果でヒーターが設置された上層コイルの最内層1ターン目のみに電圧上昇が観測されたことを考慮し、解析モデルの簡略化および計算時間の短縮のため、図1に示す上層コイルの1ターン目周囲をモデル化し、式(1, 2)を用いて有限要素法により定式化した。超伝導特性はn値モデルを採用し、実測した I_c を用いた。クエンチ時の数秒間における伝導冷却の効果はほぼないとして、モデル表面を断熱境界とした。式(1)の ϕ はスカラーポテンシャル、 σ は安定化層または超伝導層の導電率である。式(2)の T は温度、 C は熱容量、 k は熱伝導率、 Q_j は式(1)から求まるジュール発熱、 Q_{heater} はヒーター投入熱を表す。なお、各物性値の温度依存性も考慮した。

$$\nabla \cdot \sigma(\nabla \phi) = 0 \quad (1)$$

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q_j + Q_{heater} \quad (2)$$

3. 結果

初期冷却温度 50 K、通電電流 210 A (負荷率 0.6) でヒーター投入 (0-0.8 s) によりクエンチした実験と解析結果を図1に示す。実験と解析はともに区間 56 (V56、ヒーターが設置されている) で最初に電圧上昇が始まり、隣接の区間へ伝播していく。実験結果の区間 56 の到達温度 (T56) は予め測定した線材抵抗値の温度依存性より 90 K 以上の領域を算出した。Vcoil が 100 mV に達したときの T56 は実験と解析ともに約 145 K である。また、コイル電圧 (Vcoil) がクエンチ検出電圧 (40, 60, 100 mV) と検出時間 (10ms, 50ms, 100ms) に対するホットスポット T56 の温度を表1に示す。解析結果は実験結果とよく一致しており、検出電圧 100 mV で検出時間 100 ms においてホットスポットの温度は 200 K 未満である。当日はさらに初期冷却温度や銅安定化厚の異なる結果についても報告する予定である。

謝辞

本研究は科学研究費補助金(15H03667)の助成により実施したものである。

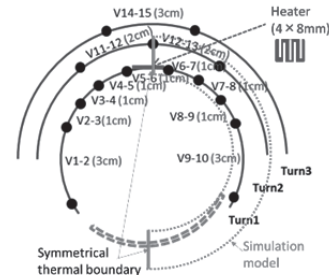


Fig.1 Schematic of simulation model.

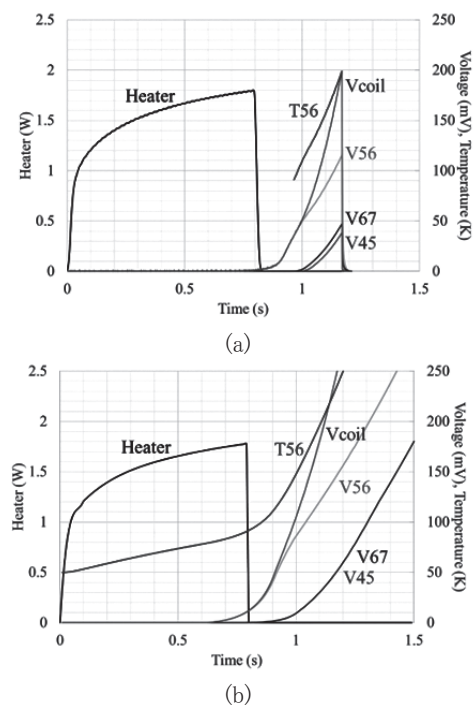


Fig. 2 (a) Experimental and (b) simulation results of quench test at an operating temperature of 50 K and with an coil current of 105 A.

Table 1 The hotspot temperature of the coil after quenching for certain detection conditions.

	Experiment			Simulation		
	40 mV	60 mV	100 mV	40 mV	60 mV	100 mV
10 ms	102 K	119 K	145 K	111 K	122 K	149 K
50 ms	119 K	137 K	166 K	125 K	137 K	168 K
100 ms	142 K	163 K	197 K	146 K	160 K	193 K

参考文献

1. K. Tsuchiya et al., Abstracts of CSJ Conference, Vol. 92 (2015) 3B-p01
2. S.Fujita et al., Abstracts of CSJ Conference, Vol. 92 (2015) 3B-p02

加速用 HTS マグネットの開発(4-4)

- ReBCO 導体の 4.2 K における臨界電流の測定 -

Development of HTS Accelerator magnet (4-4)

- Ic measurement of ReBCO conductors at 4.2 K -

鈴木 恵子 (上智大); 土屋 清澄, 寺島 昭男, 多和田 正文, 増澤 美佳 (KEK); 則本 知哉, 高尾 智明 (上智大); 菊池 章弘 (NIMS); 藤田 真司, 大保 雅哉, 飯島 康祐 (フジクラ)

SUZUKI Keiko (Sophia Univ.); TSUCHIYA Kiyosumi, TERASHIMA Akio, TAWADA Masafumi, MASUZAWA Mika (KEK); NORIMOTO Kazuki, TAKAO Tomoaki (Sophia Univ.); KIKUCHI Akihiro (NIMS); FUJITA Shinji, DAIBO Masanori,

IJIMA Yasuhiro (Fujikura)

E-mail: kiyosumi.tsuchiya@kek.jp

1. はじめに

近年、CERN を中心として LHC 加速器の次期の計画、100 TeV クラスの超大型加速器 Future Circular Collider (FCC) の検討が始まっている。そこで必要とされるリング用高磁場マグネットは 16-20 T の 2 極マグネットであり、現時点では Nb₃Sn の 16 T マグネットと HTS の 20 T マグネットの 2 つが候補に上げられている。今後これらの磁石開発が世界的に進められようとしているが、我々はその第一歩として ReBCO 導体の 4.2 K に於ける臨界電流特性の研究を開始した。本稿ではその測定の概略と現時点で得られている結果について報告する。

2. 臨界電流の測定

SuperPower とフジクラの 4 種類の ReBCO 導体を用意した。実験に使用した ReBCO 導体の諸元を Table 1 に示す。また、測定用ホルダーは、垂直磁場下での I_c 特性を見るために U 型のホルダーを用意した。ホルダーの外観を Fig. 1 に示す。

I_c 測定は、0 T ~ 18 T の範囲で磁場を変化させて行った。液体ヘリウムで冷却しているため、測定温度は、4.2 K である。サンプルの長さは 190 mm、電圧タップは、3 か所用意した。電圧タップの位置と長さを Fig. 2 に示す。V25=25 mm、V118=118 mm、V3=153 mm である。臨界電流は、V25 タップにおける電界が 1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ となった時の値とした。

Table 1. Specifications of ReBCO

	SuperPower-AP	SuperPower-CF	FYSC-SCH05	FYSC-SCH04
Width (mm)	4.00	4.00	5.00	4.00
Thickness (mm)	0.094	0.094	0.120	0.120
Cu Stabilizer (μm)	40	40	40	40

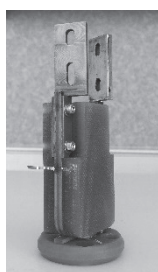


Fig. 1. U-Holder

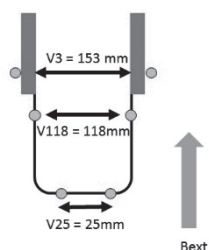


Fig. 2. Voltage tap

3. 測定結果

SuperPower とフジクラの ReBCO 導体の U 型ホルダーにおける、 $I_c - B$ 特性を Fig. 3, Fig. 4 に示す。全ての線材において、垂直磁場下、4.2 K での測定が可能であった。SuperPower の線材で大きく差が見られているのは、線材の用

途が違うからであると考えられる。AP 線は、77 K から 4 K の低温・高磁場用に作製され (ピンが導入されており)、CF 線は 77 K・低磁場用に作製され (ピンが導入されていない) ている [1]。そのため、各磁場において、AP 線の I_c 値が高い結果となった。フジクラの線材は線材幅の違いにより I_c 値に差が見られた。

また、全ての線材における $I_c (@B, 4.2\text{K}) / I_c (@0\text{T}, 77\text{K})$ を算出し、比較を行った。結果を Fig. 5 に示す。フジクラの線材は、どちらもほぼ同じ値となったが、SuperPower の線材では、CF 線と AP 線で差が見られた。AP 線は CF 線やフジクラの線に比べ高い $I_c (@B, 4.2\text{K}) / I_c (@0\text{T}, 77\text{K})$ 値をもっていることがわかった。

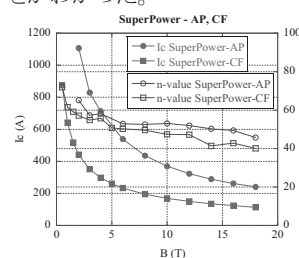


Fig. 3. $I_c - B$ at 4.2 K for SuperPower wires.

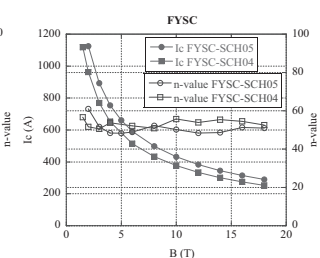


Fig. 4. $I_c - B$ at 4.2 K for Fujikura wires.

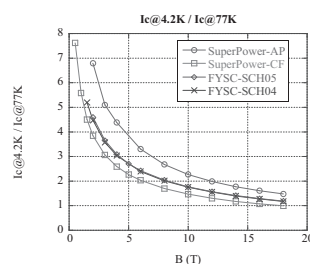


Fig. 5. $I_c(4.2\text{K})/I_c(77\text{K})$ for SuperPower and Fujikura wires

4. まとめ

ReBCO 導体の 4.2 K における臨界電流測定を行った。用意した全ての線材において、垂直磁場下での I_c 測定が可能であった。フジクラの線材では、線材幅による I_c 値の差が見られたが、磁場依存性や n 値はどちらも同じような結果となった。また、SuperPower の線材では、AP 線と CF 線で特性の違いが見られた。

謝辞

本研究は科学研究費補助金 (15H03667) の助成により実施したものである。

参考文献

1. SuperPower :

www.superpower-inc.com/content/wire-specification

LHC 高輝度アップグレード用超伝導磁石の開発(6)-2 m モデル磁石の製作

Development of superconducting magnets for LHC luminosity upgrade (6) – 2 m model magnet fabrication

菅野 未知央, 中本 建志, 榎本瞬, 川又弘史, 岡田尚起, 岡田竜太郎, 東憲男,

田中賢一, 高橋直人, 荻津透, 木村誠宏, 佐々木憲一, 山本明, 吉田誠, 飯尾雅美 (高エネ研)

SUGANO Michinaka, NAKAMOTO Tatsushi, ENOMOTO Shun, KAWAMATA Hiroshi, OKADA Naoki, OKADA Ryutarou, HIGASHI Norio, TANAKA Kenichi, TAKAHASHI Naoto, OGITSU Toru, KIMURA Nobuhiro, SASAKI Kenichi, YAMAMOTO Akira, YOSHIDA Makoto, IIO Masami (KEK)

E-mail : michinaka.sugano@kek.jp

1. はじめに

CERN-LHC 加速器では、積分ミノシティを現行 LHC の 10 倍以上である 3000 fb^{-1} まで向上させることを目指した高輝度化アップグレード計画 (HL-LHC) が進行中である。このために特に重要になるのが ATLAS 及び CMS 実験衝突点近傍の加速器システムの性能向上であり、KEK はビーム分離超伝導双極磁石 (D1 磁石) の開発を担当している。D1 磁石は、衝突点直前に設置される最終ビーム収束用超伝導四極磁石の後段に配置される。衝突点で同一軌道上で交差する 2 つのビームを再び分離して、別々の周回軌道に戻す役割を担う。現行の D1 は 6 台の常伝導磁石から構成されているが、これを超伝導化することで、主双極磁場を 1.28 T から 5.6 T (運転温度 1.9 K、運転電流 12 kA) まで高磁場化でき、磁石長を 15 m 短縮することができる。これにより、四極磁石の磁石長が増加するにも関わらず、新たにクラブ空洞を設置する空間を確保できるというメリットがある。

D1 磁石の断面構造を Fig. 1 に示す。D1 磁石製作の技術的課題として、ボア径 150 mm という大口径化に伴ってより顕著になる鉄ヨークの飽和を考慮した設計、25 MGy 以上と想定される放射線に耐え得る絶縁材料を用いた磁石開発などが挙げられる。実機の機械長は約 6.7 m であるが、原理検証のために KEK で 2 m 長のモデル磁石の製作を行っている。今回は、このモデル磁石の開発状況について報告する。

2. コイル巻線

巻線に用いたケーブルは CERN から提供された Cu/NbTi ラザフォードケーブルである。コイル直線部 2 次元断面は 4 ブロック、合計 44 ターンのケーブルで構成されている。コイルエンドの設計は、平均多極成分の低減や巻線性を考慮して、昨年度製作した 2 m テストコイル[1]から設計を変更した。

エンドスペーサーやウェッジには耐放射線性の GFRP (ビスマレイミドトリアジン (BT) 樹脂 + S2 ガラス繊維) を用いた。この材料は 100 MGy の γ 線照射でも曲げ強度が劣化しないことが確認されている。

巻線張力は 40 kgf から開始し、1 ターンごとに 0.25 kgf ずつ低下させた。

3. キュアリング

ケーブル/スペーサー間、隣接するケーブル同士の接着を目的とするキュアリングを実施した。前者には耐放射線性の接着材であるシアネートエステルを用い、後者はケーブルのポリイミド絶縁の自己融着を利用する。種々の条件を勘案し、 $150^\circ\text{C} \times 4 \text{ 時間} + 180^\circ\text{C} \times 8 \text{ 時間} + 190 \sim 205^\circ\text{C} \times 30 \text{ 分}$ という温度プロファイルを設定した。キュア後のコイルの写真を Fig. 2 に示す。コイルの接着は単層コイルとして構造を維持するのに十分な接着を有することが確認された。

4. コイルサイズ測定

キュアリング後のコイルサイズ測定を実施した。Fig. 3 にコイル軸方向の各点でコイルを最終寸法まで押し込む

のに必要な応力の測定結果を示す。直線部分に相当する中心付近のフラットな部分で $80 \sim 90 \text{ MPa}$ となっており、予備応力として負荷する予定の 80 MPa と良く一致している。このことから、製作したコイルがほぼ設計通りの寸法を有することが確認された。

5. まとめ

LHC の高輝度化アップグレードの一環として、D1 磁石の 2 m モデルの製作を進めている。これまでに 1 対の 2 m 長コイルの巻線、キュアリングが完了しており、寸法測定や電気試験等を経て、カラーリング、ヨーキング、シャル溶接などの組立作業を行う予定である。現在、そのための磁石部品の調達も並行して進めている。2016 年に KEK の縦型クライオスタットにて本磁石の 1.9 K での励磁試験を予定している。

参考文献

[1] M. Sugano et al, Abstract of CSJ Conference, Vol. 90 (2014) 201.

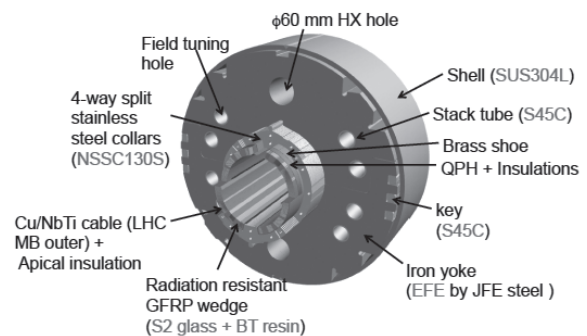


Fig. 1 Exploded view of D1 magnet

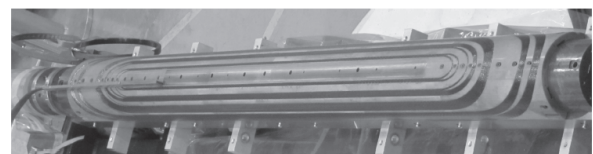


Fig. 2 2 m-long-coil after curing.

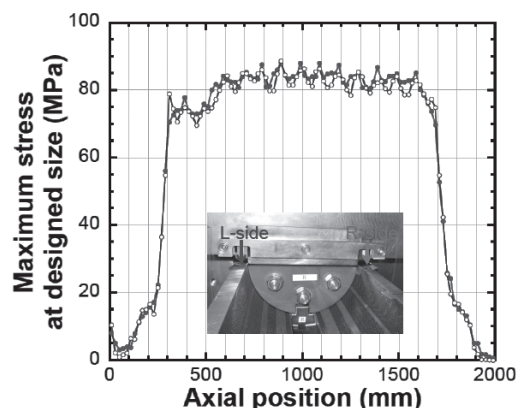


Fig. 3 Result on coil size measurement for the bottom coil.

LHC 高輝度アップグレード用超伝導磁石の開発 (7) -200mm ショートモデル開発(2)

Development of superconducting magnets for LHC luminosity upgrade (7) - Development of 200mm long mechanical short model (2)

榎本瞬, 菅野未知央, 中本建志, 川又弘史, 岡田竜太郎, 岡田尚起, 東憲男, 荻津透, 佐々木憲一, 木村誠宏, 田中賢一 (KEK), MUSSO Andrea, TODESCO Ezio (CERN)

ENOMOTO Shun, SUGANO Michinaka, NAKAMOTO Tatsushi, KAWAMATA Hiroshi, OKADA Ryutaro, OKADA Naoki, HIGASHI Norio, OGITSU Toru, SASAKI Kenichi, KIMURA Nobuhiro, TANAKA Kenichi (KEK), MUSSO Andrea and TODESCO Ezio (CERN)

E-mail : enoshun@post.kek.jp

1. はじめに

欧州原子核研究機構(CERN)のLHC加速器では高輝度化アップグレードを計画している。高エネルギー加速器研究機構(KEK)ではビーム衝突点近くの超伝導双極磁石(D1)の開発を行っている。磁石は口径150mm, 全長7mとなり、超伝導コイルにはNbTi超伝導線を用い、磁場は12kA, 1.9Kで5.6T, 積分磁場長35Tmを公称値としている。

KEKでは、磁石の機械構造設計の検証や製造工程の確認のために磁石の直線部断面形状を模擬する200mm長のショートモデルの開発を行ってきた。大まかな工程について以下に示す。

- (1)コイル巻線
- (2)キュアリング
- (3)コイルサイズ測定
- (4)コイル直線部の切り出し
- (5)カラーリング
- (6)ヨーキング
- (7)シェル溶接

このうち、(1)-(3)に関しては本講演前に行われる連続講演を確認されたい。2015年春季講演では精度の劣るレーザーカット製部品を用いて、主に機械皇族設計や製造工程の検証を目標とした200mmショートモデル(1)について報告した。今回は、カラーとヨークを実機と同等の高い精度で製作された部品に置き換え、かつシェル溶接した200mmショートモデル(2)を試作した。液体窒素冷却した際の機械的振る舞いを含め、本講演で報告する。

2. D1 磁石の機械構造

D1磁石は内側から超伝導コイル、非磁性鋼カラー、鉄ヨークの順に配置されている(Fig. 1)。超伝導コイルは鉄ヨークを基準にしてカラーによって精密に位置決めされ、電磁力を含む機械構造的な指示は鉄ヨークが担う設計になっている。

超伝導双極磁石では一般的に上下ペアのカラーを用いるが、D1磁石では円周を4つのカラーで分割している。それぞれのカラーは油圧プレスで押され、先端の長孔にロックピンを挿入する事でコイルとの仮組立が行われる。

カラー仮組後のコイルは最終寸法よりも大きい状態だが、上下ペアのヨークが油圧プレスで押されることで、コイルもヨーク内周に押し込まれ、コイルに必要な周方向予備応力が与えられる。ヨークの左右に挿入されるロックキーにより、プレス後も圧縮応力が保たれる設計になっている。冷却及び励磁(定格の110%)による減少分を考慮して、周方向予備応力の目標値を約80MPaに設定している。

3. 200mm ショートモデルの製作

ショートモデル用のコイルには、2m長テストコイルの直線部から250mmを2か所切り出して上下に重ねて双極磁石と同様のコイル断面を形成する。切り出す箇所はコイルサイズ測

定の結果から判断をした。コイルの重ね方は組立時の周方向コイル面圧が最も高くなる場合を模擬するため、コイルの大きい部分が重なるように設置した。

前回のショートモデル(1)では、レーザーカットで製作したカラーとヨークを用いたが、今回は精密金型打ち抜きでカラーとヨークを製作し、より実機に近いものとなっている。各工程では目視および外形寸法測定により工程の確認をすると共にカラーおよびヨークにひずみゲージを取り付けることによって内部にかかる応力測定を行った。ANSYS計算と比較した結果、今回の200mmショートモデル(2)では測定値とよく一致することも確認された(Table. 1)。

その後シェルを溶接し、さらに液体窒素で冷却したがTable. 1に示すように、内部応力をモニタリングし想定内の振る舞いであることを確認した。

4. まとめ

LHC加速器の高輝度化アップグレードの一環として、D1磁石の200mmショートモデルの製作を行った。カラーリング、ヨーキング、シェル溶接を完了し、磁石製作上の技術的課題の確認を行った。今後は、D1モデル磁石として2m長の超伝導双極磁石の製作を行う予定である。

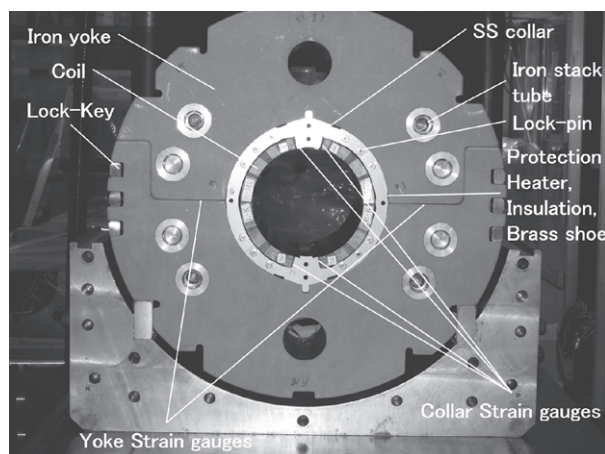


Fig. 1. Picture of 200-mm-long mechanical model after the yoking

Table. 1 The results of the coil stress and yoke strain at the fabrication processes.

	Collaring	Yoking	Insert Lock-keys	Shell Welding	Cooling @LN ₂
Coil stress Calculation [MPa]	5.1	71.6	70.4	70.4	57.7 @1.9K
Collar[MPa]	-0.1	76.5	67.7	63.0	39.6
Yoke[$\mu\epsilon$]		902	542	685	921

ITER Nb₃Sn CICCコイルのクエンチ試験 Quench test on ITER Nb₃Sn CICC

諏訪 友音, 尾関 秀将, 名原 啓博, 斎藤 徹, 河野 勝己, 高橋 良和,
磯野 高明, 布谷 嘉彦(原子力機構)

SUWA Tomone, OZEKI Hidemasa, NABARA Yoshihiro, SITO Toru, KAWANO Katsumi,
TAKAHASHI Yoshikazu, ISONO Takaaki and NUNOYA Yoshihiko (JAEA)
E-mail: suwa.tomone@jaea.go.jp

1. はじめに

中心ソレノイド(CS)インサート試験は ITER CS 実機と同じ設計のケーブルインコンジット導体を約 42 m 用いて行われた、長尺導体試験である。実機の定格条件を模擬した試験では、クエンチすることなく定格性能を達成しており、安定な導体であることが確認された。インサートコイルには温度計などの計測素子が多数取り付けられており、導体長にわたっての測定が可能である。コイル保護と安全性の観点から、クエンチ後の挙動を調べることは重要であるため、意図的にクエンチを発生させ、常伝導伝播速度や温度上昇を詳細に調べた。

2. クエンチ試験

ITER CS 導体は、576 本の Nb₃Sn 素線、288 本の Cu 素線、中心チャンネルおよびステンレスジャケットから成っている。CS 導体は超臨界 He (SHe)を用いた強制冷却導体で、導体下部から上部に向かって SHe は流れる。Fig. 1 に示すように、導体中央部には、10 個の電圧タップが 1/4 ターンずつ(約 1.2 m)取り付けられテイル。また、6 個のセルノックス温度計が 750 mm 間隔で取り付けられている。

クエンチ試験は、プラズマ燃焼終了(EOB)条件と同じ 12 T、45.1 kA 通電時に行った。クエンチは、誘導ヒーターを用い導体のほぼ中央を加熱することで発生させた。誘導ヒーターによる加熱は様々な電圧で行い、導体への入熱量を制御した。誘導ヒーターはインサートコイル中央の電圧タップ VD1112 間に取り付けられている。クエンチ試験時の導体初期温度は約 4.7 K である。

3. クエンチ試験における常伝導伝播

誘導加熱後の電圧波形から、CS インサート中の常伝導伝播速度を求めた。誘導加熱後の代表的な電圧波形を Fig. 2 に示す。Fig. 2 は、誘導ヒーターを設置した区間 VD1112 からコイル上側に 1 ターンの電圧を 1/4 ターンずつプロットしている。グラフ上では、誘導ヒーターによる加熱開始時刻をゼロとしている。常伝導転移を示す電圧の発生は、電圧の時間微分 dV/dt より求めた。VD1112 で、加熱から 0.85 秒後に常伝導転移が観測された。その 9.4 秒後に電源を遮断した。電源遮断までに、インサートコイル上側と下側の 2.25 ターンずつまで常伝導転移が発生したことを確認した。Fig. 3 に常伝導伝播速度の時間変化を示す。常伝導伝播速度は隣り合う電圧タップの距離と電圧発生の時間差から求めた。時間経過に伴い常

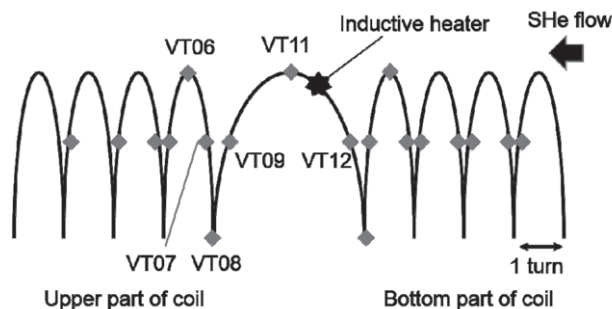


Fig. 1 Schematic view of the insert coil. VT shows voltage taps. VD means voltage between VTs.

伝導伝播速度は加速しており、過去の試験結果と一致する [1]。電流遮断直前ではコイル上部、下部ともに、伝播速度は約 1.8 m/sec となっている。

クエンチ後の導体の熱的な挙動を、GANDALF [2][3]を用いて解析する。GANDALF はケーブルインコンジット導体の電氣的、熱流体的な特性を評価する計算コードである。GANDALF では導体を、ジャケット、素線、素線間を流れる He および中心スパイラルを流れる He の 4 要素に分けて計算を行う。

参考文献

- [1] Isono Takaaki, *et al.*, Abstract of CSJ conference vol. 36 (2001) 373.
- [2] L. Bottura, A Numerical Model for the Simulation of Quench in the ITER Magnets, *Jour. Comp.*, 124, (1), 1996. *Phys.*, 124, (1), 1996.
- [3] L. Bottura, *Physica C*, 310, 316-326, 1998.

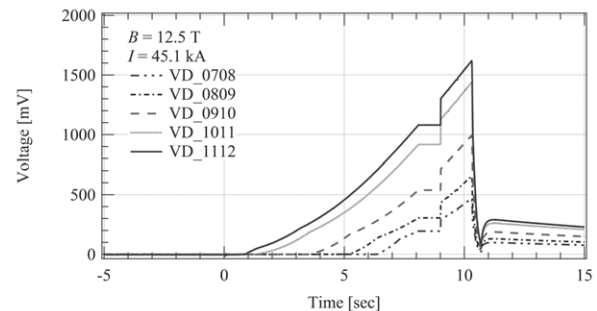


Fig. 2 Voltage on upper part of the insert coil from the center. The coil was heated at zero sec by the inductive heater.

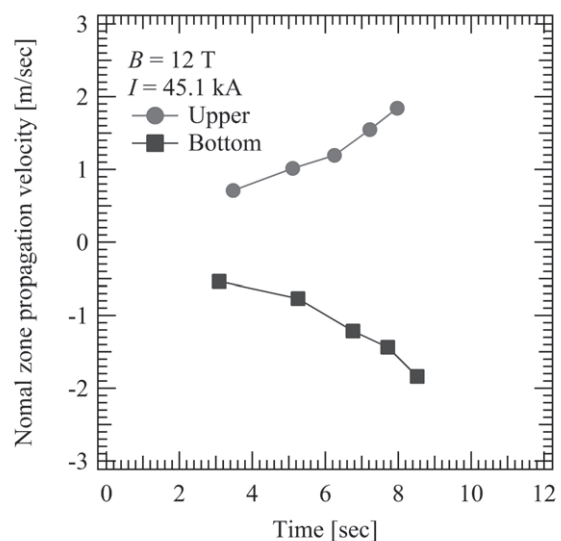


Fig. 3 Normal zone propagation (NZIP) velocity. The NZIP accelerate with increase of the time.

ITER CS インサート導体の分流開始温度特性

Characteristics of current sharing temperature of ITER CS insert conductor

名原 啓博, 諏訪 友音, 尾関 秀将, 櫻井 武尊, 梶谷 秀樹, 井口 将秀, 辺見 努, 下野 貢, 海老澤 昇, 佐藤 稔, 河野 勝己, 磯野 高明, 布谷 嘉彦, 高橋 良和, 齊藤 徹, 山崎 敬太, 宇野 康弘, 川崎 勉, 西野 克巳, 山崎 亨, 奥野 清(原子力機構)

NABARA Yoshihiro, SUWA Tomone, OZEKI Hidemasa, SAKURAI Takeru, KAJITANI Hideki, IGUCHI Masahide, HEMMI Tsutomu, SHIMONO Mitsugu, EBISAWA Noboru, SATO Minoru, KAWANO Katsumi, ISONO Takaaki, NUNOYA Yoshihiko, TAKAHASHI Yoshikazu, SAITO Toru, YAMAZAKI Keita, UNO Yasuhiro, KAWASAKI Tsutomu, NISHINO Katsumi, YAMAZAKI Toru, OKUNO Kiyoshi (JAEA)

E-mail: nabara.yoshihiro@jaea.go.jp

1. はじめに

ITER の中心ソレノイド (CS) 用超伝導導体は 2015 年 10 月の時点で全量の約 40% (長さ 613m の導体を 4 本、918m の導体を 16 本) を製作した。これらの導体性能は、スイスにある SULTAN 試験装置を用いてこれまで評価して来た。ただ、SULTAN では定格運転条件 (13 T, 40 kA) の磁場を印加できず、また CS はソレノイド状なので通電時にフープ力による機械的歪み加わりますが、SULTAN 試験の直状導体ではこれを再現できない。さらに、SULTAN では最高磁場領域の長さが約 50 cm と狭いことも懸念事項であった。そこで、長さ 80 m の導体をソレノイド状にした CS インサート (CSI) 導体を製作し、2015 年 3 月から 4 ヶ月余りかけて那珂核融合研究所の CS モデル・コイル試験装置を用い、定格運転条件での試験などを行ったので、その結果を本稿で報告する。

2. 分流開始温度 (T_{cs})

CSI 試験では 16,000 回の繰返し通電と 3 回の昇温・再冷却を行い、適宜、 T_{cs} 測定などを行った。 T_{cs} は定格運転条件 (13 T, 40 kA) の他、SULTAN 試験結果と比較するため、SULTAN 試験条件 (11.5 T, 45.1 kA) でも測定した。Fig. 1 に繰返し通電回数に対する T_{cs} を示す。比較のため、同図には CSI と同一の導体の SULTAN 試験結果 [1] も示した。

定格運転条件の T_{cs} に関しては、設計値 (5.2 K) に対して 1.5 K 以上の大きな裕度を維持し続けることができた。5,000 回までの繰返し通電の間、 T_{cs} はほぼ一定で、1 回目の昇温・再冷却後に 0.11 K 上昇し、その後は -2.18×10^{-5} K/cycle で低下した。2 回目の昇温・再冷却後に 0.07 K 上昇し、その後は -1.29×10^{-5} K/cycle で低下した。そして 3 回目の昇温・再冷却後に 0.04 K 低下したものの、その後の T_{cs} はほぼ一定化した。

SULTAN 試験条件の T_{cs} に関しては、CSI 試験では SULTAN 試験よりも T_{cs} が約 0.5 K 高い。CSI 試験ではフープ力による 0.077% の正の歪み加わりますが、この歪みは T_{cs} に換算してほぼ 0.5 K の上昇に相当することから、両試験結果は整合していると言える。

16,000 回の繰返し通電の後は、過負荷試験 (13 T, 50 kA と 13 T, 55 kA) での T_{cs} 測定、遮断時間を遅らせたクエンチ試験、逆通電試験 (13 T, -30 kA と 13 T, -40 kA) での T_{cs} 測定、過負荷逆通電試験 (13 T, -50 kA) での T_{cs} 測定などを行った。その後、定格運転条件で再び T_{cs} を測定したところ、16,000 回の時より 0.034 K 低下した。ただ、更に交流損失試験や遮断時間を遅らせたクエンチ試験などを行った後の、最後の T_{cs} 測定では低下が見られなかった。

3. 電磁力に対する分流開始温度の低下

Nb_3Sn 燃線に加わる電磁力が T_{cs} を低下させることはよく観測されており、CSI 試験でも低い電磁力下での T_{cs} 測定を行い、電磁力の影響を調べた。 T_{cs} の低下は歪み (有効歪み ε_{eff}) として表現でき、電磁力 ($B_{avg} I$) に対する歪みを Fig. 2 に示す (逆通電時の電磁力は負の $B_{avg} I$ とした)。比較のため、ここにも SULTAN 試験の結果を示した。CSI 試験ではフープ力による

歪み ε_{hoop} が加わるが、これは導体表面上に設置してある歪ゲージで測定した。CSI 試験の ε_{eff} は $B_{avg} I > 0$ で正の傾きであるが (電磁力に対し T_{cs} が上昇したことを意味する)、これは電磁力による T_{cs} 低下よりも正の ε_{hoop} による T_{cs} 上昇が上回ったためである。なお、この正の傾きは繰返し通電を経て小さくなった。一方、逆通電 ($B_{avg} I < 0$) では ε_{hoop} が負になるため、大きな負の ε_{eff} になる。

CSI 試験でフープ力の効果を除いた $\varepsilon_{eff} - \varepsilon_{hoop}$ と、SULTAN 試験の ε_{eff} を比較すると、繰返し通電前は絶対値が異なるものの、傾きはほぼ同じである。繰返し通電後は絶対値が近くなったが、CSI 試験の方が負の傾きは大きくなった。

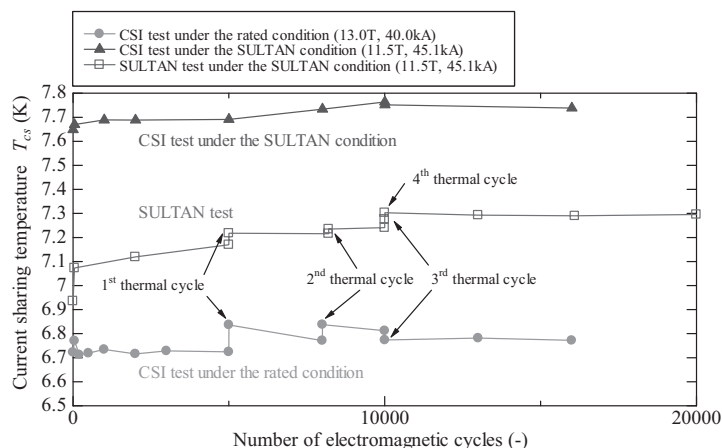


Fig.1 Current sharing temperature against electromagnetic cycles.

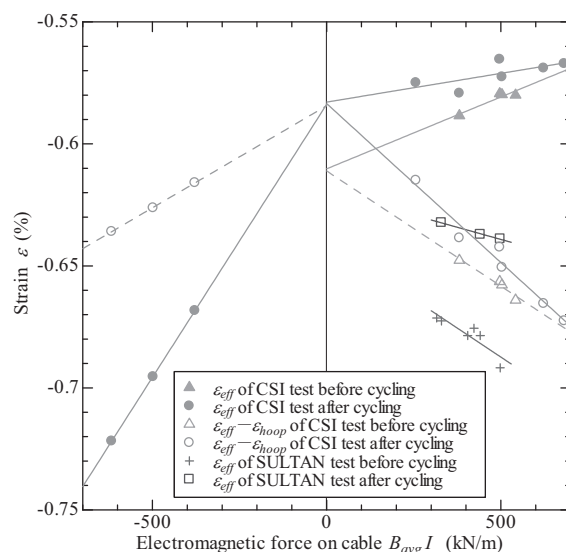


Fig.2 Strain against the electromagnetic force on cable.

参考文献

1. Y. Nabara, et al.: "Performance Analysis of Mass-Produced Nb_3Sn Conductor for Central Solenoid in ITER," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, (under review)

ITER 中心ソレノイド(CS)インサートコイル用導体の機械特性

Mechanical property of ITER Central Solenoid (CS) insert coil conductor

齊藤 徹, 尾関 秀将, 諏訪 友音, 名原 啓博, 河野 勝己,
高橋 良和, 磯野 高明, 布谷 嘉彦(原子力機構)

SAITO Toru, OZEKI Hidemasa, SUWA Tomone, NABARA Yoshihiro, KAWANO Katsumi,
TAKAHASHI Yoshikazu, ISONO Takaaki, NUNOYA Yoshihiko (JAEA)

E-mail: saito.toru08@jaea.go.jp

1. はじめに

超伝導体(Nb₃Sn)の分流開始温度(T_{cs})は、磁場、電流及び歪みにより変化し、CS 直状導体を極低温へ冷却するとジャケット熱収縮によって超伝導体は圧縮歪みを受け、圧縮歪みを受けない場合と比較すると T_{cs} は低下することが知られている。ITER 運転条件下の T_{cs} 評価は、これまで直状導体のみで、CS コイルの運転においては、電磁力により導体長手方向に引張歪み(導体周歪み)が発生することで熱収縮による圧縮歪みを緩和し、 T_{cs} を上昇させることが判っている。しかし、CS コイル導体に関しては、どの程度まで上昇するかは不明であった。そのため、 T_{cs} 上昇の要因を評価するためには、通電時の導体周歪みへの影響を評価する必要がある。

本報では ITER・CS コイル運転条件下での CS 導体表面の周歪みに着目し、CS インサートコイル用導体の機械特性を歪みゲージ法により計測、評価した。

2. 試験体及び試験条件

試験装置の一部である CSMC (CS モデル・コイル)は、直径約 1.6m で最大 13T を発生することができる。また、試験装置に合わせて CSI (CS インサート)コイル用導体を製作した。CSI コイル用導体は長さ約 40m の導体を直径約 1.5m の 1 層 9 ターンでコイル化したものである。これを CSMC 試験装置に組み込み、液体ヘリウム温度環境下で試験を実施した。なお、CSI コイル及び CSMC は冷却、昇温及び通電時の安定状態を保持するために、初期冷却前に室温中で上・下フランジとコイルを固定するための 16 本の CSI タイロッドに引張予荷重をそれぞれ均一に負荷した。

CSI 試験では EOB 条件(12.5T, 45.1kA 通電)の繰り返し通電を行い、任意の通電サイクルでサイクル試験を中断し、IM 条件(13T, 40.0kA 通電)で T_{cs} 測定のための通電を行った。なお、サイクル試験途中で昇温・冷却(WUCD)を 3 回実施した。さらに、EOB, IM 条件以外にも通電試験 16,000 サイクル達成後に CSI コイル逆通電(13T, -50kA 通電)等の複数条件で通電を行っている。歪み計測はコイル周方向歪み(表面 7 ヶ所)及び CSI タイロッド(16 本)の中央表面における軸歪みを歪みゲージ法によりそれぞれ計測した。図 1 に CSI コイル及び CSMC の概略図を示す。

3. 試験結果

通電サイクル途中でサイクル試験を中断し、IM 条件通電保持時の歪みを測定した結果を、CSI コイル周歪みと繰返し数でまとめた S-N 線図を図 2 に示す。初期サイクルではコイル上下部で約 300ppm、中央部 5 ヶ所で約 700ppm であった。試験終了までの歪みの変位は 7 ヶ所全てで引張側に増加し、その現象は昇温・冷却前後で変動することを確認した。また、通電試験 16,000 サイクル達成後に実施した CSI コイル逆通電後の IM 条件においても僅かではあるが引張側に増加する傾向を示した。

IM 条件下での各 CSI タイロッドの歪み分布測定結果を図 3 に示す。タイロッド#16 を除く 15 本は概ね均等に引張歪みが生じていることを確認した。また、繰り返し通電、昇温・冷却及び逆通電等による歪みの著しい変化は認められなかった。

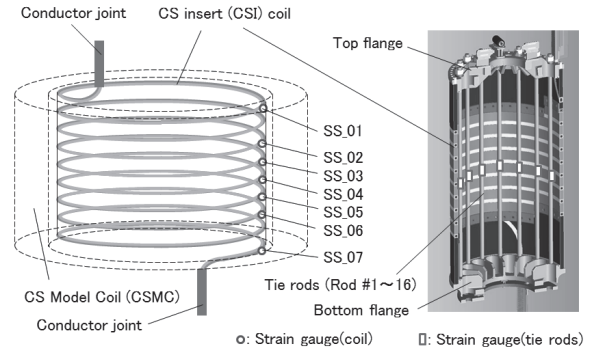


Fig.1 Schematic drawing of CSI Coil and CSMC

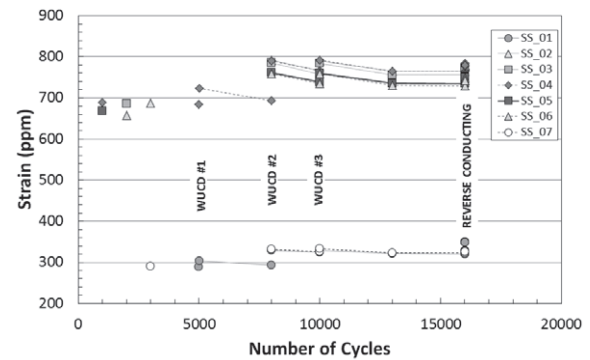


Fig.2 S(Strain)-N diagram at IM condition

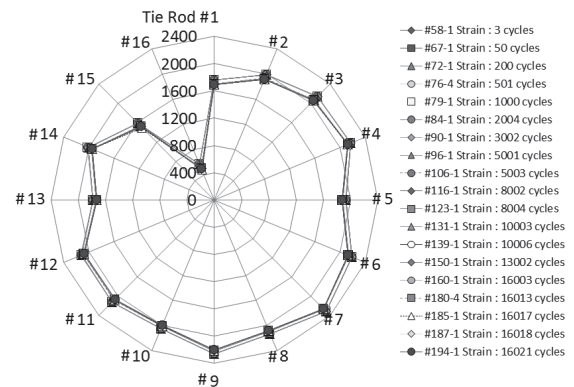


Fig.3 Strain distribution of Tie rods at IM condition

4. まとめ

T_{cs} 上昇の要因と考えられている CS コイル導体通電時の導体周歪み、繰り返し通電及び 3 回の昇温・冷却による影響を定量的に確認、評価することができた。また、今回の試験結果から、プラズマ電流を流すために不可欠な CS コイルの安定動作を確認することができた。

ITER CS インサートの試験結果 - 試験方法 - Test Results of CS Insert for ITER - Test Method -

磯野 高明, 河野 勝己, 尾関 秀将, 齊藤 徹, 名原 啓博, 諏訪 友音, 下野 貢, 海老澤 昇, 佐藤 稔,
宇野 康弘, 川崎 勉, 西野 克巳, 山崎 亨, 山崎 敬太, 高橋 良和, 布谷 嘉彦(原子力機構)

ISONO Takaaki, KAWANO Katsumi, OZEKI Hidemasa, SAITO Toru, NABARA Yoshihiro, SUWA Tomone, SHIMONO Mitsugu,
EBISAWA Noboru, SATO Minoru, UNO Yasuhiro, KAWASAKI Tsutomu, NISHINO Katsumi, YAMAZAKI Toru, YAMAZAKI Keita,
TAKAHASHI Yoshikazu, NUNOYA Yoshihiko (JAEA)

E-mail: isono.takaaki@jaea.go.jp

1. はじめに

原子力機構では ITER 中心ソレノイド(CS)用導体の調達を進めており、今回、その超伝導性能を CS モデル・コイル試験装置を用いて評価した。試験コイル(CS インサート)は、実機 CS 導体約 40m を用いた 1 層 9 ターンのコイル[1]で、CS モデル・コイルの内側に挿入して試験した(図 1)。導体の性能評価は、これまでスイスの SULTAN 試験装置を用いて行ってきたが、その高磁場部が約 0.4m と最終撚りピッチ程度であるのに対して、本試験では 10m 以上の範囲が高磁場部にあり、より信頼性のある測定ができる。SULTAN 試験[2]と同様に、本試験でも 16000 回の繰り返し通電、3 回の室温までの熱履歴を行い、分流開始温度(Tcs)の変化を測定した。試験長さ以外の SULTAN 試験との違いとしては、磁場が 13T であること、試験コイルがフープ力により歪むことの Tcs への影響、及びクエンチ試験である[3]。ITER の CS の定格条件としては、初期励時(IM)の 13T, 40kA と、プラズマ燃焼終了時(EOB)の 12.5T, 45.1kA の 2 種類がある。本試験は 2015 年 3 月から 7 月にかけて実施した。本稿では、これらの試験方法について報告する。Tcs、機械特性、クエンチ試験、誘導加熱校正の試験結果について、本セッション内で講演がある。

2. 試験方法

CS インサートの計測素子の配置を Fig. 2 に示す。温度センサーは 8 個、歪みゲージは 7 個、導体上に取付けた。スター電圧タップとは、同一断面内に 6 点配置した電圧タップを意味し、サルタン試験で用いている電圧測定と同じ方法で測定するために取付けた。

Tcs 測定は、より Tcs が低い IM 条件で主に実施し、CS インサートの冷媒供給温度を上げ、電圧発生、温度及び歪みを測定することで求めた。一方、繰り返し通電は、電磁力が大きい EOB 条件で実施し、CS モデル・コイルが発生する磁場中で、CS インサートを 0kA から 45.1kA まで 5kA/s で通電した。

熱履歴を与える(WUCD)試験は、CS モデル・コイルも昇温すると約 3 ヶ月掛かることから、CS インサートのみを昇温することにより期間を大幅に減らすことを計画し、今回初めて実施した。まず、CS モデル・コイルを冷凍機から切り離し、CS インサートのみ冷凍機を用いて、CS インサートの導体及び入出の温度差を 50K 以内に制御しながら昇温した。この熱履歴を 2 週間に納めるためには、CS モデル・コイルの温度上昇を 80K 程度に抑える必要があり、300K までの昇温期間を 3 日と計画した。これを達成するため比熱が大きくなる温度領域では、通電加熱を追加した。Fig.3 に最初の WUCD 時の温度を示す。CS インサートの温度はセンサーによる測定値、CS モデル・コイルの各層の温度は、抵抗値から換算して求めた。

電磁力によるコイルの歪みが Tcs に及ぼす影響を評価するため、磁場は 13T として電流値を変え Tcs を測定した。範囲を広範囲にとるため、CS インサートは逆方向にも通電した。

クエンチ試験は、電流値が高い EOB 条件で主に実施し、コイル中央に配置した誘導ヒータで導体加熱し、クエンチを生じさせた。クエンチ後挙動を測定するため、最大 7 秒、保護動作を遅らせた試験を実施した。誘導ヒータによる入熱量を求めため、別途、校正サンプルを製作し、試験した。

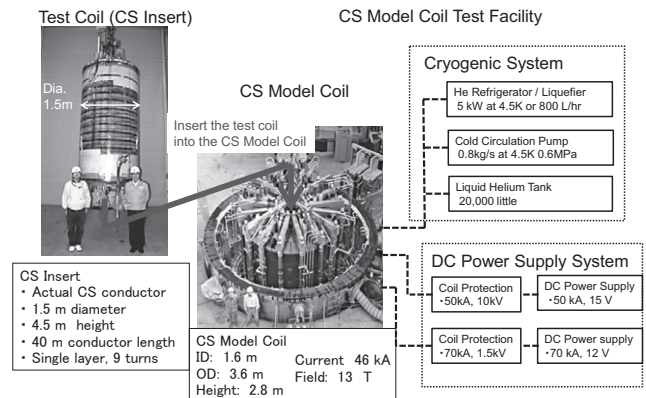


Fig.1 Test Coil and Test Facility

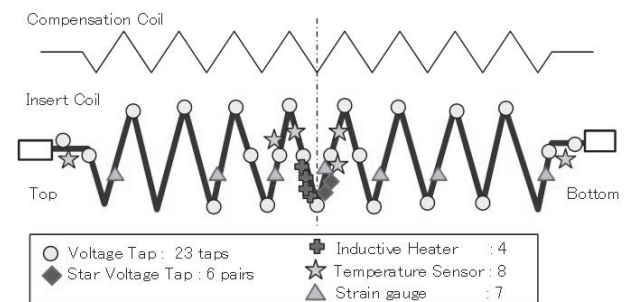


Fig.2 Instrumentation of the CS insert coil

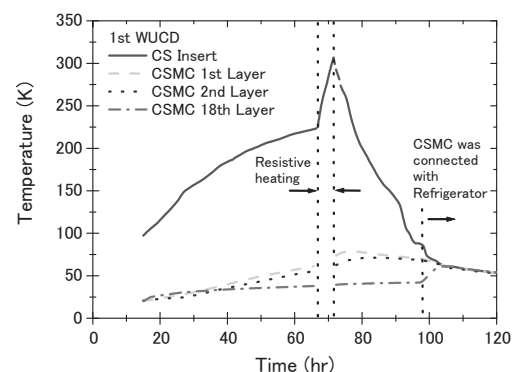


Fig.3 Temperature properties during warm-up and cool-down of CS insert only (WUCD).

参考文献

1. T. Isono, et al.: IEEE Trans. On Appl. Supercond., 25 (2015) 4201004
2. Y. Nabara, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 87 (2013) p.185
3. T. Isono, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 88 (2013) p.13

ITER CS インサートコイルの誘導加熱試験 Inductive Heating Test of ITER CS Insert Coil

尾関 秀将, 諏訪 友音, 磯野 高明, 高橋 良和, 河野 勝己, 名原 啓博, 齊藤 徹, 布谷 嘉彦(原子力機構)
OZEKI Hidemasa, SUWA Tomone, ISONO Takaaki, TAKAHASHI Yoshikazu, KAWANO Katsumi, NABARA Yoshihiro,
SAITO Toru, NUNOYA Yoshihiko (JAEA)
E-mail: ozeki.hidemasa@jaea.go.jp

1. 緒言

原子力機構では、ITER の CS (セントラル・ソレノイド) 導体の導体性能試験を実機と同じソレノイド形状で行うため、CS インサートコイル(CSI)という直径1.44m、巻数8.875ターンのソレノイド型サンプルを製作し(図1の左側写真参照)、実機運転条件である外部磁場13T、通電電流45.1kAを含む種々の条件で通電試験を行った。一連の通電試験の中では、CSI のクエンチ特性を評価するために、外部から導体中へ誘導加熱を起こす誘導ヒーターを設け、誘導加熱試験を行った。誘導加熱試験の主な目的は、CSI においてクエンチを起こす最小エネルギーを評価すること、及びクエンチ時の常伝導伝播特性を解析することにある。本発表で論じるのは前者であるが、これはITERのCSコイルの運転時における熱的・電磁的擾乱に対して、どれだけの裕度があるかを調べる上で重要である。CSI の最少クエンチエネルギーを評価するに当たり、以下の手順で実験を行った。①誘導ヒーターのサンプルを製作(図1の右側写真参照)し、CSI 試験とは別の体系で加熱量校正実験を実施し、加熱量を評価した。②CSI 通電試験において誘導ヒーターによる CSI の加熱を行い、クエンチが起こるときの誘導ヒーターからのエネルギー投入量を求めた。

2. 誘導ヒーターサンプルを用いた加熱量校正実験

図1右側写真のサンプルを用いて、誘導ヒーターによる加熱量(加熱エネルギー)を熱量法的に評価する実験を行った。この実験方法[1]では、誘導ヒーターによる加熱エネルギーは液体 He を気体 He に状態変化させるために利用され、このとき発生した気体 He の体積を測定した。誘導加熱では、正弦波電流を誘導ヒーターに投入することにより導体を加熱する。従って、投入エネルギー E_h [J]は次の(1)式、

$$E = C \int_0^{t_h} I_h^2 dt \quad \dots(1)$$

により与えられる。ここで、 I_h [A]は誘導ヒーターの正弦波電流、 t_h [s]は加熱時間を表す。 C_h [J/(A²·s)]は導体への投入エネルギーに対する誘導ヒーター電流の比例定数であり、これを実験的に求めた。また、気体 He のガス量と加熱エネルギーの関係は、10Ωの抵抗ヒーターにより校正した。本実験により得られた誘導ヒーターの加熱量とヒーター電流の関係を図2に示す。 C_h の値は図2のグラフにおける傾きであり、従って $C_h = 0.15$ とわかった。

3. CS インサートコイルにおける誘導加熱試験

CS コイルと同等の運転条件である45.1kAの通電を12.5Tのバックアップ磁場の下でCSIに対して行った状態で、CSIに取り付けられた図1と同じ誘導ヒーターを用いて、CSIの誘導加熱を行った。CSIに投入されたエネルギーについて、CSIのHeガス下流側における導体上に設置された温度計の指示値から熱量法的に評価した。このときのコイル温度の時間的推移の一例を図3に示す。図中に示される温度計番号TS04～TS01は、誘導ヒーター設置端部からHeガス下流側へ向かってそれぞれ291mm、1066mm、1847mm、そして19.6mの位置にあり、時間と共にHeの流れによって熱が下流へと移る様子を観測した。また、このときのヒーターへの通電電流値も測定し、これらの測定結果を元に解析を行った。誘導ヒーターの通

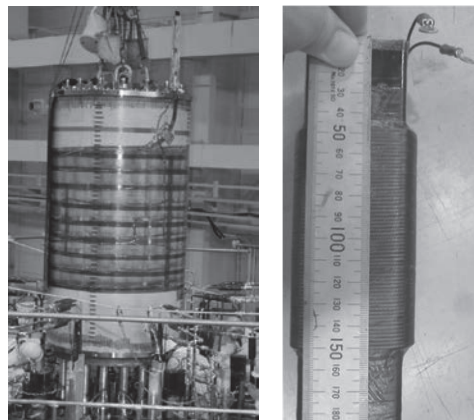


Fig. 1 A picture of CS Insert Coil (CSI) at the installation (left) and inductive heater sample for the calibration test of its heating energy, which has the same winding geometry with the CSI (right).

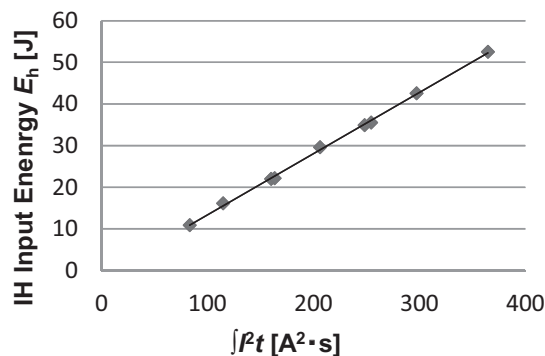


Fig. 2 Inductive heating energy calibration test result with the heater sample shown in Fig. 1

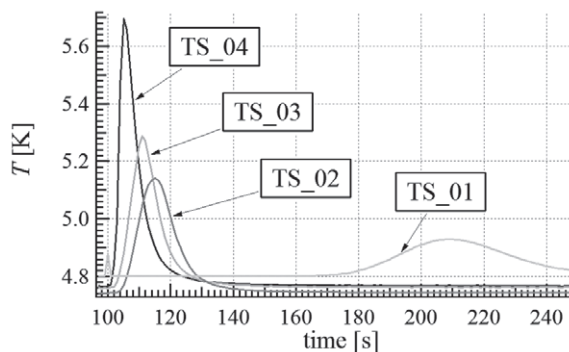


Fig. 3 Temperature transition of the CSI after inductive heater shot at $\int I_h^2 dt = 1474$ [A²s].

電電流値は徐々に上昇させ、最終的にCSIにクエンチを生じさせ、その際の投入エネルギーを調べた。本試験・解析結果の詳細は口頭にて発表する。

参考文献

1. 小泉徳潔ら：低温工学 Vol. 32 No. 6 (1997) p.263