

プレートフィン型熱交換器の基礎特性評価

Evaluation of heat-exchange efficiency in plate-fin heat exchangers

前田 淳, 石原 篤, 小林 祐介, 赤坂 友幸, 福本 祐介, 鈴木 賢次, 富田 優 (鉄道総研)
 MAEDA Atsushi, ISHIHARA Atsushi, KOBAYASHI Yusuke, AKASAKA Tomoyuki, FUKUMOTO Yusuke,
 SUZUKI Kenji, TOMITA Masaru (Railway Technical Research Institute)
 E-mail: maeda.atsushi.40@rtri.or.jp

1. はじめに

高温超電導ケーブルは、一般に超電導状態を維持するために液体窒素を循環しており、液体窒素をガス化することなく循環させるために、ケーブルや配管からの発熱、ケーブル端末やケーブル部からの熱侵入などの合計熱量を冷凍機で冷却してバランスをとっている。一方で、超電導ケーブルの既存設備への導入を考えた場合、限られた空間の中に冷凍機や循環ポンプなどの冷却システムを設置する場合が大半であり、その省スペース化が大きな課題となる。ここで冷却システムのうち最も占有体積が大きい冷凍機の中で、最も大きなスペースを占める熱交換器の小型化が省スペース化に最も効果的であるといえる。

本研究では熱交換器の小型化を実現するために、長さの異なる対向流型に流路を構成したアルミニウムプレートフィン型熱交換器を作製し、それぞれの熱交換効率を測定することで、熱交換器の特性を評価した。

2. 実験方法

幅 100 mm、厚さ 6.35 mm の低温熱交換流路 7 層 (A 層)、高温熱交換流路 6 層 (B 層) が交互に重ねられた計 13 層のアルミニウムプレートフィン型熱交換器 (幅 130 mm、厚み 106 mm) において、長さ 1300 mm、1100 mm、900 mm の 3 つの熱交換器サンプルを準備した。また、熱交換器の 6 層目と 7 層目に一定距離毎に穴加工を施し、温度センサを取り付けた。各サンプルを真空容器に入れ、熱交換器へ流す窒素ガスの入口圧力と出口圧力を調節することで一定流量 (約 500 L/min) を流し、熱交換器の性能を評価した (Fig.1)。

3. 結果と考察

長さ 1100 mm サンプルの A 層に約 100 K の低温気体、B 層に約 293 K の高温気体を対向流となるように流した際の熱交換器内部の温度分布を Fig.2 に示す。また、この時の A 層及び B 層を流れる気体の熱交換量の差を Fig.3 に示す。

熱交換器の温度が安定するまでに各層に流す気体の冷却エネルギーの損得について時間順に考えれば、30 分までは A 層の気体の冷却エネルギーは熱交換器の筐体を冷やすことにほぼ全て使用され、B 層との熱交換はほとんどなく、その後 240 分までは熱交換器の筐体を冷やすと同時に B 層の気体を冷やし始め、最終的には全ての冷却エネルギーは B 層の気体との熱交換へと使われ、平衡状態になることがわかった。

当日は長さの異なるサンプルの結果や熱交換効率についても報告する。

4. 謝辞

本研究は国立研究開発法人 科学技術振興機構の研究成果展開事業「戦略的イノベーション創出推進プログラム (S-イノベ)」の支援を受けて進めたものである。また実験にあたり、(株)前川製作所の玉田紀治氏、池内正充氏に協力をいただいた。

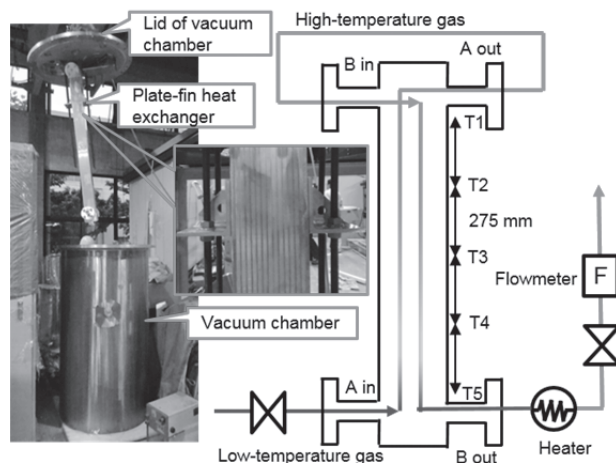


Fig.1 The experimental system of 1100 mm plate-fin heat exchanger

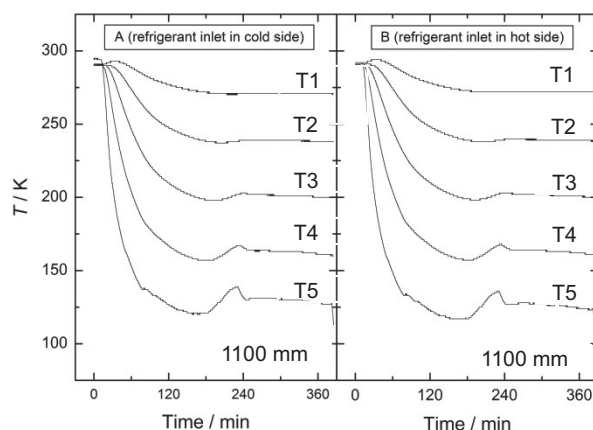


Fig.2 The temperature distribution in the heat exchanger

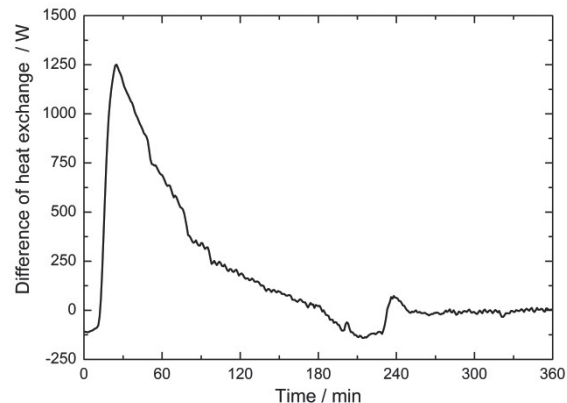


Fig.3 Time dependence of difference of heat exchange

輻射シールドにおける中間温度からの輻射熱負荷測定(2)

Measurement of heat leaks by radiation in low temperature (2)

李 智媛, 横山 彰一, 佐藤 伸治 (三菱電機)

LEE Jiwon, YOKOYAMA Shoichi, SATO Shinji (Mitsubishi Electric Corp.)

E-mail: Lee.Jiwon@ds.MitsubishiElectric.co.jp

1. はじめに

MRI などの超電導マグネットの極低温装置において、大型化に伴い輻射シールドからの熱負荷が無視できなくなってきた。しかし、極低温下では金属の比熱が非常に小さく、微小な熱の出入りでも温度が容易に変化するため、輻射熱負荷測定は非常に困難である。これまで極低温における輻射熱負荷測定の研究は、測定装置が大型であり、冷媒を使った計測のため、例えば 4.2K と 77K の一定温度での測定しかできなかった[1]。本研究では、小型で温度可変の伝導冷却要素試験装置[2]を用いた輻射熱負荷測定を試みた。前回、この小型伝導冷却要素試験装置を用いて中間温度から輻射熱負荷を測定した[3]。本報告では、前回に続き材料の違いや表面粗さによる輻射熱負荷測定を実施したので、その結果を報告する。

2. 輻射熱負荷測定

前回、Fig.1 に示す伝導冷却要素試験装置を用いて、輻射熱負荷を測定する方法を開発したことを報告した[3]。本装置では、高温側ステージと低温側ステージに任意の材質を配置すれば、その材質の組合せで輻射熱負荷が測定できる。前回の報告では、Table1 の#1(高温側アルミニウム(以下 Al)と低温側ステンレス(以下 SUS)の組合せ)と#2(Al と Al)で測定している。

今回実施した測定条件は Table1 の#3~#5 である。#3 に用いたアルミホイル(市販品)は、高温側と低温側にそれぞれ配置した Al と SUS の表面にアルミニウムテープで貼りつけた。#4 は高温側に鏡面(Ra=0.02 μ m)の Al、低温側に鏡面処理なしの SUS(Ra=0.1 μ m)を、#5 は同順で鏡面(Ra=0.02 μ m)の Al、処理なしの Al(Ra=0.2 μ m)とした。#3 にて低温側基材に SUS を、#4 で低温側に SUS を選択した理由は、実機では渦電流等の問題から液体ヘリウム槽に SUS を用いる必要があるためである。低温側温度は 8K 一定、高温側温度は 100K、120K、140K で測定し、前回と同じである。

3. 結果と考察

Fig.2 に輻射熱負荷測定結果を示す。前回報告した#1(Al と SUS)と#2(Al と Al)を比較すると、低温側材質を SUS から Al に変更することで、輻射熱負荷は 46%低下する(高温側温度 120K) [3]。

#3 は#1 の高温側、低温側両面にアルミホイルを貼りつけた構成にあたり、輻射熱負荷は#1 よりも 56%(同温度)低下する。また両面に Al 板を用いた#2 と比べても#3 の輻射熱負荷は 21%(同温度)低下する。

#4 は#1 の高温側材質である鏡面処理なし Al を、鏡面仕上げ処理に変更した構成にあたる。この処理により 62%(同温度)低下する。また、#5 は#2 の高温側材質である鏡面処理なし Al を、鏡面仕上げ処理に変更した構成にあたるが、56%(同温度)低下する。

このように、アルミホイルの貼りつけや高温側に鏡面 Al を用いることで輻射熱負荷が 50%(@高温側温度 120K)以上低減できることを確認した。これらの結果から、高温側と低温側のどちらへの対策がより効果が高いかを明確化することで更なる

輻射熱低減を目指す。

4. まとめ

輻射熱負荷低減を検討するため開発した、伝導冷却要素試験装置を用いて輻射熱負荷低減を検討した。その結果、高温側ステージの表面粗さが輻射熱負荷低減に大きく影響することを確認した。

参考文献

- [1] 天野俊之ほか: 日本機械学会論文集(1990-1) p146
- [2] 横山彰一ほか: 第 81 回低温工学・超電導学会予稿集(2009) p141
- [3] 李智媛ほか: 2015 年度春季低温工学・超電導学会予稿集(2015) p106

Table1 Experimental Condition

試料	高温側 (TH) 温度: 100K,120K,140K	低温側 (TL) 温度: 8K
#1	Al (Ra=0.2 μ m)	SUS (Ra=0.1 μ m)
#2	Al (Ra=0.2 μ m)	Al (Ra=0.2 μ m)
#3	Al+アルミホイル	SUS+アルミホイル
#4	鏡面 Al (Ra*=0.02 μ m)	SUS (Ra=0.1 μ m)
#5	鏡面 Al (Ra*=0.02 μ m)	Al (Ra=0.2 μ m)

*Ra: 面粗度

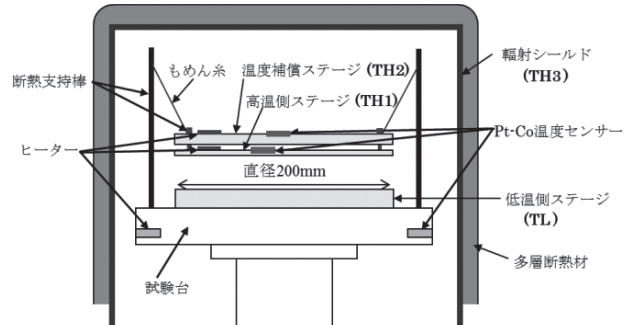


Fig.1 Configuration of experimental apparatus

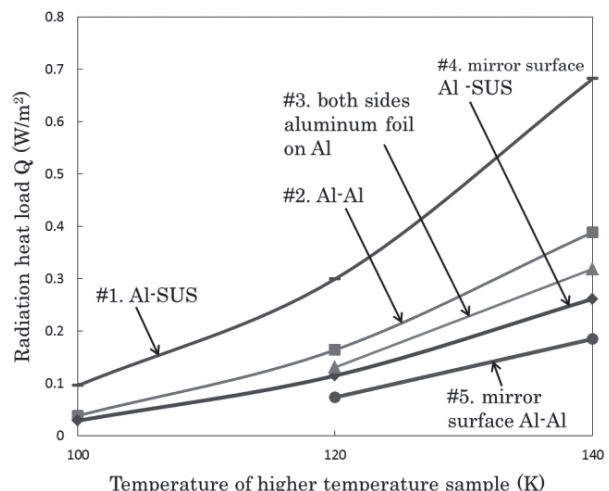


Fig.2 Radiation heat load vs. temperature of higher temperature sample.

高純度アルミニウムの塑性変形による伝導特性への影響

Effect of Plastic Strain on Conductive Properties of High Purity Aluminium

永田 章, 久保 雄輝, 星河 浩介(住友化学)

Akira NAGATA, Yuki KUBO, Hiroaki HOSHIKAWA (SUMITOMO CHEMICAL. Co.,Ltd)

E-mail: nagataa@sc.sumitomo-chem.co.jp

1. はじめに

純度 5N (=99.999%) 以上の高純度アルミニウムは低温下での電気伝導、熱伝導に優れ、純度が高いほど良好な特性を示し、熱伝達材や遮蔽材として用いられる。塑性変形(塑性歪)により伝導特性が低下するため、通常は塑性歪を熱処理によって除去した焼鈍品が使用されるが、用途によっては塑性加工後に熱処理が実施できない場合がある。したがって塑性歪による伝導特性への影響を把握することは実用上重要であり、①塑性変形による比抵抗寄与の温度依存、②塑性変形による伝導特性の低下に着目し、これらの定量的な評価を試みた。

2. 塑性変形による比抵抗の温度依存性

厚さ 1.2 mm の 5N-Al の板材を 2 点用意し、厚さ 1.0 mm まで冷間圧延し、塑性歪を導入した。そのうち一方を加工したまま(歪あり材)で、もう一方を 500 °C、3 時間に熱処理し(歪なし材)、試験に供した。これら試料に対し 5 K から室温 (296 K) までの電気抵抗測定を行い、歪あり材の抵抗値と歪なし材の抵抗値の差分から塑性歪による比抵抗寄与 ($\Delta \rho$) を求めた。5 K から室温までの温度における $\Delta \rho$ には温度依存性がみられ (Fig.1)、温度の上昇にともなって増加した。4.2 K と 77 K における比抵抗寄与については過去の報告があり、その文献値 [1]-[4] と今回の実測値はおよそ一致するといえる。5 K における塑性歪による比抵抗寄与 $\Delta \rho_{5K} = 1.9 \times 10^{-7} \Omega \text{m}$ に対し、室温 (296 K) での値は $23.8 \times 10^{-7} \Omega \text{m}$ と、約 12 倍に増加した。

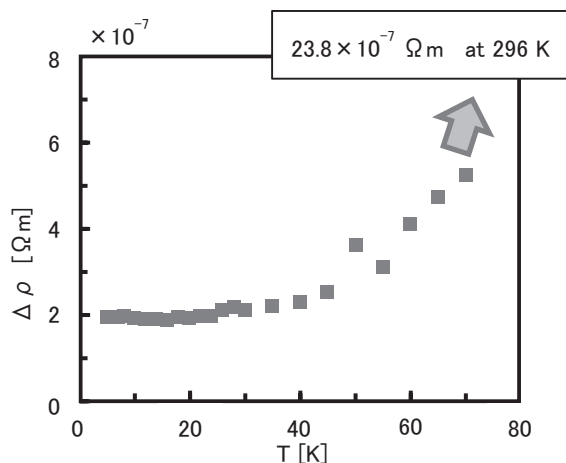


Fig.1 Temperature dependence of specific resistivity increment caused by plastic strain for 5N-Al.

3. 曲げ加工と極低温電気特性の関係

熱処理により塑性歪を除去した厚さ 0.5 mm の 5N-Al の板材(長さ 150 mm、幅 10 mm)に対し、種々の曲げ加工(曲率 R3、①90° 曲げ 1 回、②90° 曲げ 2 回、③180° 曲げ 2 回、④90° 曲げ 6 回の計 4 点)を行い、4.2 K にて電気抵抗測定を行った。得られた抵抗値と曲げ加工を施していない試料の抵抗値の差分から曲げ加工による比抵抗寄与 ($\Delta \rho$) を求めた。また、比較材として、同形状の 6N-Al および 5N-Cu (無酸素銅) に対し同様の曲げ加工(曲率 R3、180° 曲げ 1 回)を行った。その結果、曲げ加工による比抵抗寄与は曲げ角度の合計にほぼ比例して増加した (Fig.2)。厚さ 0.5 mm 材での塑性変形による抵抗増加は、加工時の曲げ角度の合計を用いて、以下の式によって見積もることができる。

$$\Delta \rho [\Omega \text{m}] = 1.76 \times 10^{-9} \times (\theta_{\text{total}} / L)$$

$$\theta_{\text{total}}: \text{曲げ角度の合計} [^\circ], L: \text{試料長さ} [\text{mm}]$$

また、5N-Al と 6N-Al の曲げ加工による抵抗増加はおよそ一致しており ($\Delta \rho = 3.3 \times 10^{-9} \Omega \text{m}$)、純度による差は確認されなかった。さらに、5N-Cu に同様の曲げ加工を施したところ、5N-Cu の曲げ加工による抵抗は 5N-Al の約 6 倍 ($\Delta \rho = 19.9 \times 10^{-9} \Omega \text{m}$) と大きい結果が得られた。

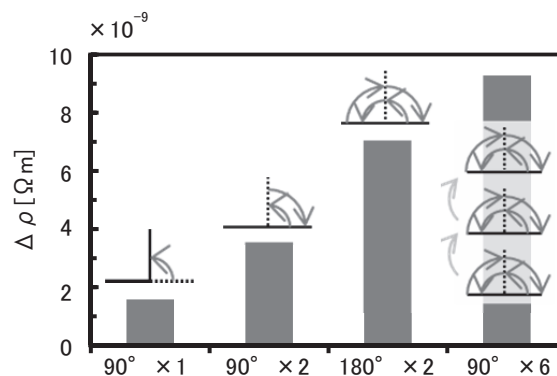


Fig.2 Specific resistivity increment caused by several bending processes for 5N-Al.

参考文献

1. L.M.Clarebrough, et. al.: Phil. Mag., **6** (1961), p.807
2. J.G.Rider, et. al.: Phil. Mag., **13** (1966), p.289
3. T.Kino, et. al.: J.Phys.Soc.Japan, **36** (1974), p. 698
4. S.Yoshida, et. al.: J.Phys.Soc.Japan, **20** (1965), p.1662

石狩プロジェクトにおけるペルチェ電流リードのデータ収集システム

Data acquisition system for Peltier current leads used in the Ishikari project

イワノフ ユーリ、筑本 知子、渡邊 裕文、高野 廣久、井上 徳之、山口 作太郎（中部大）

IVANOV Yury, CHIKUMOTO Noriko, WATANABE Hirofumi, TAKANO Hirohisa, INOUE Noriyuki, YAMAGUCHI Satarou
(Chubu University)

E-mail: ivanov@isc.chubu.ac.jp

1. Introduction

Reduction of heat penetrating into the cryogenic region is the important method of optimization of superconducting devices. In the cases of short-range power transmission (PT) lines and compact HTS applications, the heat leakage through current leads is relatively large. In order to decrease this contribution, current leads equipped with Peltier elements (PCL) can be used. Commercial samples of PCLs are installed at the terminals of 500-meter DC HTS cable in Ishikari (Hokkaido). This cable is designed for 5 kA. The inner conducting layer consists of 37 DI-BSCCO HTS tapes from Sumitomo Electric Industries, Ltd. with a critical current of 180 A; and the outer one consists of 35 tapes of the same type. Each end of the cable's tape is connected to the individual PCL. To examine behavior of the current leads in detail, hardware and software data acquisition system was created.

2. Hardware

Whereas each end of HTS tape equipped with individual PCL, two terminals are equipped with 144 PCL in total. Each PCL is supplied with two thermocouples. Voltage taps are also available on the feedthrough and on each end of the HTS tape. A set of current transformers can measure the currents through all of PCLs separately. Additionally, in the Ishikari project a great attention is paid to the protection of cable and construction elements of the mechanical strains due to thermal contraction. Two cryogenic load cells are install inside terminals to monitor HTS cable strain. One of the supports located inside elbow segment of the cryogenic pipe is supplied with thermometer and three pairs of strain gages. Four Keithley 3706A multimeters equipped with five 60-channel 3724 FET multiplexer cards were used. Multimeters communicate with PC via LAN. Connection via LAN allows us to read data from four spaced devices.

3. Software

Each PCL data block contains temperatures of the upper (T_h) and the lower (T_l) terminals of the Peltier element, a voltage at the Peltier element (U_1), voltage drops across the braided wire connecting PCL and feedthrough (U_2), and connecting feedthrough and HTS tape (U_3), and an individual current through the PCL (I). Therefore, 144 data blocks are created after each sampling. Furthermore, we have 72 measurements of the voltage drop across HTS tape. In total, there are 936 PCL data channels to be analyzed and recorded. The program part of the data acquisition system was written using LabVIEW software solution. As mentioned above, the program has an additional option to acquire and displays data on mechanical strains, and stores this information in separate file. Due to the large volume of data, visualization used two monitors with a resolution of 1920x1080 pixels. Data can be displayed in different modes, both graphically and digitally. The volume of stored uncompressed data is about 250 Mb/day.

The output files are written to disk once an hour. A quick real-time data recording is also provided, allowing fully restore the information in case of power failure.

4. Experiment

First cooling down of 500-meter cable was carried out successfully in May and June, 2015. Preliminary results indicate that target characteristics were achieved. PCL data acquisition system was tested for stable operation both during energization test when the transport current achieved 6 kA, and during idling. No software malfunction was observed. Real-time data monitoring enables to avoid overheating and damage of PCLs.

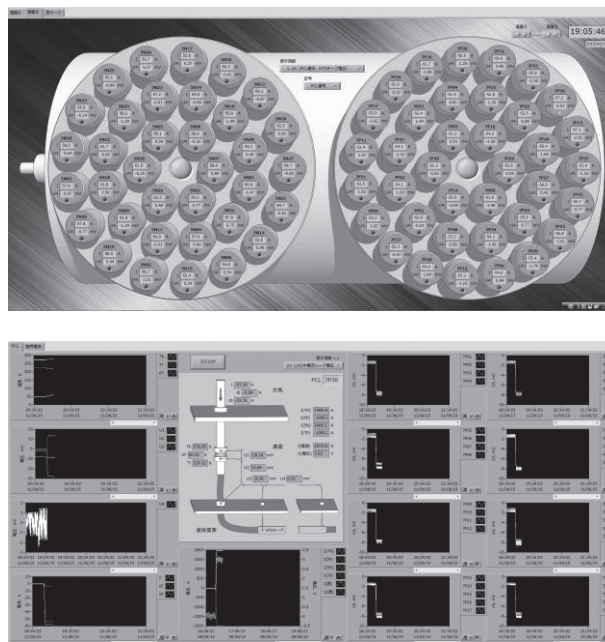


Fig. 1. Screenshots of the program.

5. Conclusion

Hardware and software system for acquisition, visualization and preliminary analysis of the working parameters of the specialized current lead array installed on 500-meter DC HTS PT line in Ishikari was created. During tests, the program operated without trouble. The system allows to carry out cable critical current measurement safely for PCLs. Moreover, the measurement of the critical current of each HTS tape is also available. The program will be used in the 1000-meter Line No. 2 after appropriate adaptation.

Reference

IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol. 25 (2015) #5402504

This work was supported in part by the Japanese Ministry of Economy, Trade and Industry (METI).

HTS MRI に望まれる冷凍機性能に関する考察

A Study on Desired Performance of Cryocoolers for HTS MRI

安藤 竜弥, 青木 学, 今村 幸信, 中山 武 (日立研開)

ANDO Ryuya, AOKI Manabu, IMAMURA Yukinobu, NAKAYAMA Takeshi (Hitachi, Ltd.)

E-mail: ryuya.ando.vc@hitachi.com

1. 要旨

MRI 磁石を例題に、高温超電導磁石に望まれる冷凍機性能に関し、経済性の観点から討した。

運転温度を仮定し、その際に NbTi に対する線材コスト上昇分を冷凍機電力の減少で吸収しようとするときに求められる電力低減を求めるという方法で試算を行った。たとえば、20K 運転を仮定するとき、現在入手可能な 20K 冷凍機に対し、電力消費を 1/4 程度まで低減する必要があるという結果を得た。

2. コスト概算

REBCO 系の超電導線の目標単価はおおむね \$30/kAm@77K (self field)とされる[1]。ここへ至る中途段階の現在の入手価格として、たとえば\$100/kAm@77K を仮定する。ここで、超電導磁石の運転温度を銅の熱伝導率が大きくなり冷却効率のよい 20K とすると、線材の電流特性は 20 倍高まり [2]、\$5/kAm@20K と見積れる。この単価は NbTi 線材のおおむね 3 倍である。

一方、2004 年時点での MRI 向けの NbTi 線材市場規模は \$90,000,000 であり[3]、超電導 MRI の台数規模は年間 2,000 台だから、1 台の MRI 磁石に使われる線材費用は、装置の磁場強度の違いを無視すれば、\$45,000 と見積ることができる。上述のように、HTS 線材単価を NbTi 線材の 3 倍と考えると、HTS MRI に使われる線材費用は\$135,000となる。差額\$9,000 を何らかの方法で吸収することが課題となる。

3. 冷凍機の消費電力

ひとつの方法は、電気代による吸収である。Nisenoff は、冷凍機の運転温度、冷却性能、および、消費電力の関係を調査した[4]。この調査は 1999 年になされたが、Fig. 1 に示すように、現在入手可能な冷凍機についてプロット(○)で表記してもおおむね間違いないと思われる。

仮に HTS MRI に使われる冷凍機を 20K, 5W とすると、Fig. 1 によれば消費電力は 2kW であり、20K, 10W では 5kW である。NbTi の MRI 磁石で多く使われる 4K, 1W の冷凍機の消費電力が約 7kW であることを考えると、電気代で有利になるためには HTS MRI は 20K, 5W で構築されることが望ましい。

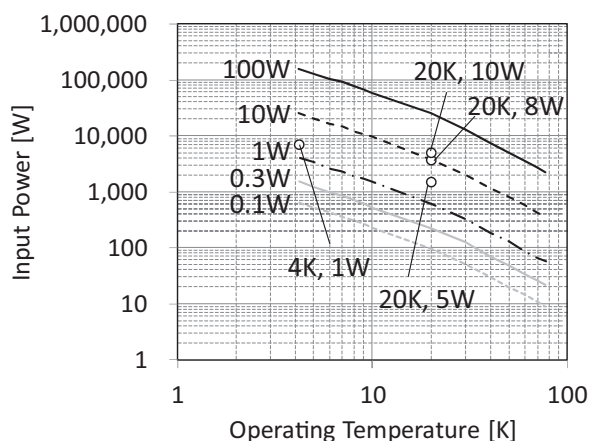


Fig. 1. Plot of the input power at various temperatures and cooling capacity⁴⁾

東京地区の事業用電力価格を\$0.16/kWh とすると、NbTi(4K, 1W)とHTS(20K, 5W)との年間の電気料金の差額は \$7,000 であり、線材価格差\$9,000 を吸収するのに 13 年かかる。

4. 消費電力改善の目安

MRI 装置の稼働年数をおおむね 10 年だとすると、線材価格の差額を冷凍機の電気代によって 10 年で回収するためには、Fig. 2 に示すように、消費電力は 1/4 にまで下げねばならない。

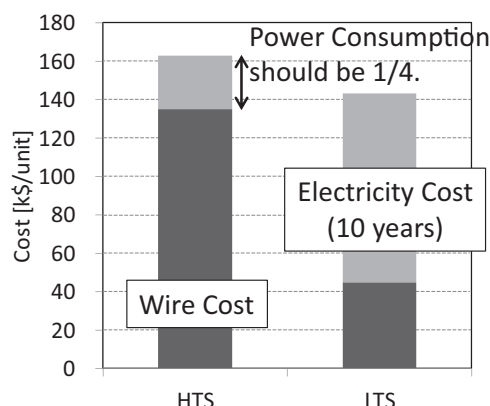


Fig. 2 Trial cost estimation (HTS vs LTS)

この試算では将来の線材価格の低下や、NbTi MRI で必須のヘリウム価格の上昇を考慮していない。たとえば MgB2 線は、遠くない将来に NbTi 線材を凌駕する価格になる予測が HyperTech Research 社から示されている[5]、ヘリウム価格は、米国 BLM のデータに基づけば、2020 年頃までにこれまでの倍近くになる様相である[6]。これらの動向を見極めながら、MRI システムとして経済的に合理的な価格を実現しなければならないと思われる。

参考文献

1. NEDO, Superconductivity Technology Development Subsequent Evaluation Report (2013), pp. 1-33.
2. H. Ohsaki, 20th International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Devices (2008), paper 92.
3. K. Marken, Applied Superconductivity Conference (2004), 2MW05.
4. M. Nisenoff, Proc. The 1999 International Workshop on Superconductivity (1999) pp. 2-5.
5. M. Tomsic, Applied Superconductivity Conference 2014, 1MOr1C-02.
6. U.S. Bureau of Land Management, Crude Helium Price (2015).

多種形状 MgB₂ 超電導バルク磁石の空間磁束密度分布評価 (2)

Evaluation of magnetic field distribution of the various shape MgB₂ superconducting bulk magnets (2)

石原 篤, 赤坂 友幸, 富田 優(鉄道総研); 岸尾 光二(東大)

ISHIHARA Atsushi, AKASAKA Tomoyuki, TOMITA Masaru (Railway Technical Research Institute);

KISHIO Kohji (The University of Tokyo)

E-mail: ai@rtri.or.jp

1. はじめに

MgB₂は、金属系超電導体最高の約 40 K の T_c をもち[1]、冷凍機冷却による超電導磁石などへの応用が期待される。さらに MgB₂ は異方性が低く、比較的長いコヒーレンス長を持つことから、無配向の多結晶体においても粒間の弱結合の問題がなく、優れた臨界電流特性を示し[2]、試料全体で均一な超電導特性[3]を示すことが期待される。すなわち、MgB₂ は超電導バルク磁石として NMR 等の計測機器への応用に実用上有利であると考えられる。

これまで我々は、均質性の優れた、大型 MgB₂ バルク体の開発を行ってきた[4]。本研究では、計測機器等への応用ポテンシャルを明らかにするために、リング状 MgB₂ 超電導バルク磁石の空間磁束密度分布の評価をしたので報告する。

2. 実験方法

Mg と B の混合粉末を 40 mmφ、厚さ 10 mm の円盤状に成型し、Ar 雰囲気下で 850°C、3 h の熱処理を行い、MgB₂ バルク体を作製し、得られたバルク体に対し、22 mmφの穴開け加工を施した。作製したリング状バルク体試料を冷凍機で 25 K まで冷却し、超電導マグネットを用いて磁場中冷却により最大 1 T の磁場下で着磁を行い、走査型ホールプローブを用いてバルク体の中心部の捕捉磁場特性の評価を行った。

3. 結果と考察

焼結後にリング加工を行った MgB₂ バルク体は、加工面にマクロスケールのクラック、ボイド等は見られなかった。バルク体中心部での 30 K における捕捉磁場の軸方向依存性と印加磁場依存性を評価した結果を Fig.1 に示すが、印加磁場の大きさに関わらず、軸方向に対称な分布が得られていることがわかる。また、バルク体中心部での 25 K における捕捉磁場の軸方向依存性を Fig.2 に示すが、加工前(φ40×10 mm³)の表面中心磁場値は 1.4 T であり、加工後(φ22/40×10 mm³)のリング中心磁場値は 0.63 T であり、ビオ・サバルの法則から推定される値と同等の値が得られた。当日は、形状効果が磁場密度分布へ与える影響についても議論する予定である。

4. 結論

MgB₂ バルク体を作製し、機械加工を施した結果、クラック等は見られず、また試料形状に由来する空間磁束密度分布が得られた。すなわち、多結晶 MgB₂ バルク焼結体は、様々な任意形状への後加工が簡便に施せることが明らかになり、機器応用に有望であることが示唆された。

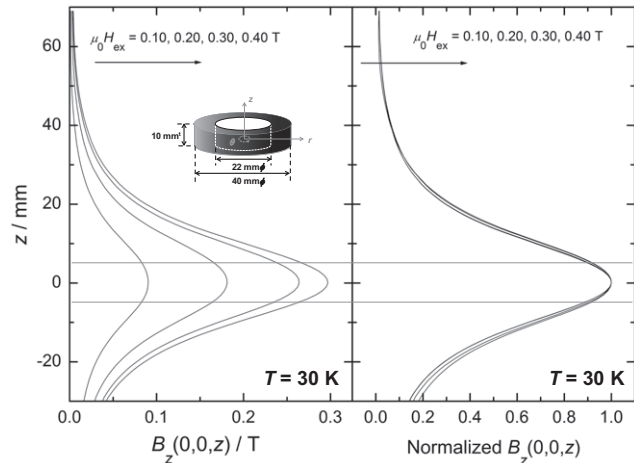


Fig.1 Applied magnetic field dependence of trapped field at 30 K in a bulk annulus (22/40 mmφ×10 mm³)

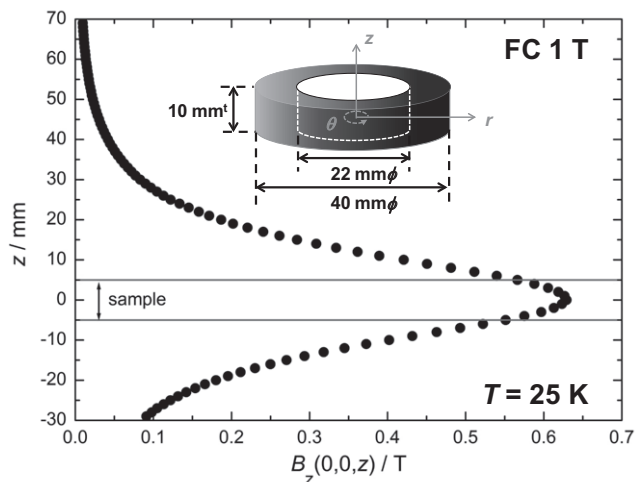


Fig.2 Height dependence of trapped field at 25 K in a bulk annulus (22/40 mmφ×10 mm³)

5. 謝辞

本研究の一部は JSPS 科学研究費助成事業(23246110)の助成を受けて実施したものである。

参考文献

- [1] J. Nagamatsu *et al.*, *Nature* **410**, 63 (2001).
- [2] D. C. Larbalestier *et al.*, *Nature* **410**, 186 (2001).
- [3] 山本明保 ほか, 応用物理 **79**, 48 (2010).
- [4] 例えば、富田優 ほか, 第 83 回低温工学・超電導学会講演概要集 p.86 (2010).

ex-situSPS 法で作製した MgB₂ 超電導バルクの粒径制御による捕捉磁場の向上

Enhancement of trapped field on MgB₂ superconducting bulks using fine MgB₂ raw poeder

遠藤 友理, 内藤 智之, 藤代 博之 (岩手大)

ENDO Yuri, NAITO Tomoyuki, FUJISHIRO Hiroyuki (Iwate Univ.)

E-mail: t2214005@iwate-u.ac.jp

1. はじめに

MgB₂ は $T_c=39$ K という金属間化合物の中で最も高い超電導転移温度を持つ超電導体であり[1]、RE-Ba-Cu-O 系(RE: 希土類元素)超電導体と比較して長いコヒーレンス長を持つことから弱結合の問題がなく、多結晶体で高い臨界電流密度 J_c を得ることが可能である。前回の学会で我々は結晶子サイズの異なる粉末を用いて高密度 MgB₂ 超電導体バルクを作製し、原料粉末が 25 nm 程度のバルクで捕捉磁場が最大となることを報告した[2]。本研究では、結晶子サイズと捕捉磁場の関係を、 J_c や各バルクの微細組織から明らかにすることを目的とした。

2. 実験方法

市販の MgB₂ 粉末(純度 99%, ≤ 50 μm)を遊星式ボールミル(250-600 rpm, 12 h, Ar 中)により粉砕した結晶子サイズの異なる 4 種類の原料粉末(50 nm, 27 nm, 9 nm, 5 nm)を用いた。原料粉末をカーボンダイス(直径 20 mm)に充填し一軸加圧成形した後、20-100 Pa の真空中において 950-1050°C で 5-15 min の SPS 処理を行った。最大印加電流は 1000 A とし、印加圧力は 50 MPa とした。試料の直径は 20 mm であり、厚さは 8-11 mm であった。伝導冷却型超電導マグネットを用いて 5 T の磁場中で MgB₂ バルクを冷却した後、外部磁場を取り除いて磁場を捕捉させ、バルク表面中心にセットした極低温用ホール素子により捕捉磁場の測定を行った。ボールミル粉砕前後の MgB₂ 粉末の構造は X 線回折法(XRD)で評価した。また、臨界電流密度 J_c は SQUID 磁束計で測定した磁気ヒステリシス曲線から拡張型ビーンモデルにより算出した。微細組織観察は走査型電子顕微鏡(SEM)を用いて行った。

3. 結果と考察

Fig. 1 に結晶子サイズの異なる粉末を用いた各バルク(Bulk 50, Bulk 27, Bulk 9, Bulk 6: 数字は結晶子サイズを表す)の捕捉磁場の温度依存性を示す。Bulk 27 は Bulk 50 に比べ捕捉磁場値が向上した。さらに、Bulk 9 と Bulk 6 では転移温度の低下が確認されたが、Bulk 6 では 27 K 以下の低温領域において捕捉磁場が向上した。このことから、Bulk 6 は Bulk 27 とは異なるピン止め挙動が存在していることが示唆される。これに対し、Bulk 9 では捕捉磁場値は低下した。

Fig. 2 に 20 K における各バルクの臨界電流密度 J_c の磁場依存性を示す。挿入図は 0 T、4 T での結晶子サイズと J_c の関係を示している。Bulk 27 では自己磁場、高磁場側共に J_c の向上が確認された。これに対し、Bulk 9 と Bulk 6 では自己磁場での J_c 値は Bulk 50 と同程度であったが、高磁場側で J_c 値はわずかに向上した。このように、27 nm より小さい結晶子サイズの粉末を用いたバルクでは J_c 値の顕著な改善は確認されなかった。

Fig. 3 に各バルク表面の SEM 像を示す。Scherrer の式により算出した SPS 後の全バルクの結晶子サイズは約 55 nm 程度であったが、Bulk 27 において Bulk 50 と比較しより細かな結晶粒が多く存在することが観察された。この結果より、2 次粒子の界面の面積が増大したため、Bulk 27 で J_c 値が向上したと考えられる。また、Bulk 6 では Bulk 50 や Bulk 27 と異なり明確な結晶粒は観察されなかった。

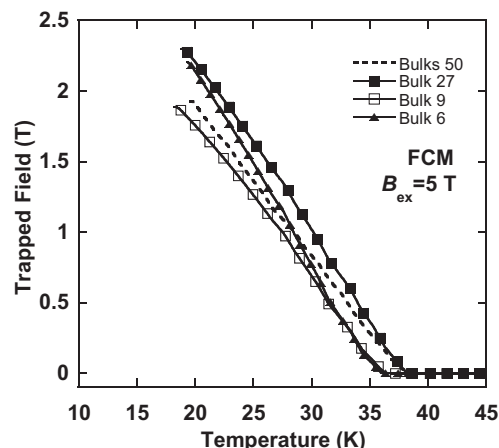


Fig. 1 Temperature dependence of the trapped field for MgB₂ bulks with various crystallites.

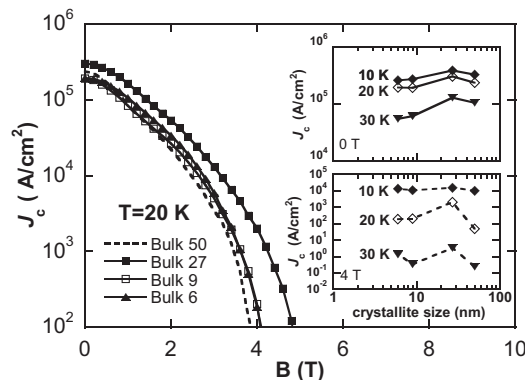


Fig. 2 Magnetic field dependence of the critical current density J_c at 20 K for various MgB₂ bulks.

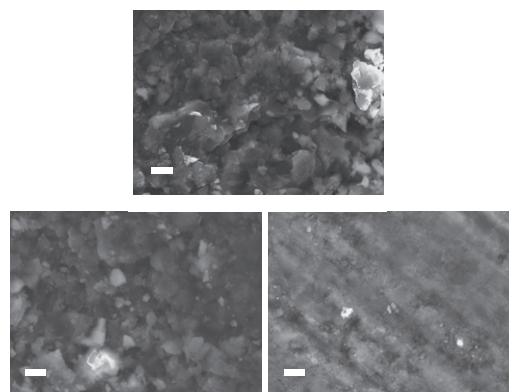


Fig. 3 SEM images of MgB₂ bulks with various crystallites.

参考文献

1. J. Nagamatsu *et al.* : Nature vol. 410 (2001) 63.
2. Y. Endo *et al.* : Abstract of CSSJ Conference, vol. 91, (2015) 3C-a07

リング状バルク超電導体における磁場補正評価 Evaluation of magnetic field correction in ring-shaped superconducting bulk

赤坂 友幸, 石原 篤, 福本 祐介, 富田 優(鉄道総研); 禹 泰城, 関野 正樹, 大崎 博之(東大)
AKASAKA Tomoyuki, ISHIHARA Atsushi, FUKUMOTO Yusuke, TOMITA Masaru (RTRI);
WOO Taeseong, SEKINO Masaki, OHSAKI Hiroyuki (Univ. of Tokyo)
E-mail: akasaka@rtri.or.jp

1. はじめに

RE系高温超電導バルク材は、液体窒素温度(77 K)で高磁場まで高い臨界電流密度を有するため、コンパクトで強い磁場発生が実現できる。本研究ではリング状に加工した高温超電導バルク体[1]を用いてマグネットを構成し、その磁場特性について評価を行った。

2. 実験方法

RE系高温超電導バルク体($\phi 80$ mm, 20 mm²)にリング状の加工を行い、さらに機械強度、熱安定性を向上させるために、金属リング補強、ならびに樹脂含浸補強を行った。このリング状バルク超電導体を複数用い、ギャップを調整して積層し、超電導マグネットにより最大3 Tの外部磁場を印加し、冷凍機冷却、もしくは液体窒素浸漬冷却で磁場中着磁を行い、極低温ホール素子で捕捉磁場分布を計測した。また、リング内部の磁場を補正するため、銅線を芯材に巻きつけるか、埋め込む形で巻線し、傾斜コイルを作製し、磁場補正を行った。

3. 結果

リング状バルク体を2層積層した際の、バルクのギャップ幅がリング中心磁場値に与える影響を計算した結果、半径20 mm球内において磁場の差異を10%以内にするにはギャップ幅を13~17 mmに設計する必要があることが分かった。また、冷凍機冷却を用いることで50 Kで磁場強度が77 Kの4倍になること、リング状バルク超電導体のギャップを調整することで、磁場均一性が5倍以上向上することがわかった。

Fig.1 に2種類の巻線手法で作製したゴレイコイルとマックスウェル・コイル・ペアの傾斜磁場コイルを示す。埋め込み型の場合、銅線の位置が固定されるため、設計通りの磁場が得られた。一方で巻きつけ型の場合、巻きつけ前の巻線精度が劣るため、設計磁場が得られない可能性があるが、Fig.2 に得られた x, z 方向の傾斜磁場を示すが、十分な線形性が得られていることがわかった。

4. 謝辞

本研究はJSPS科学研究費助成事業(24300185)の助成を受けて実施したものである。

参考文献

[1]富田 優 ほか, 第80回低温工学・超電導学会 講演概要集 p.168(2009).

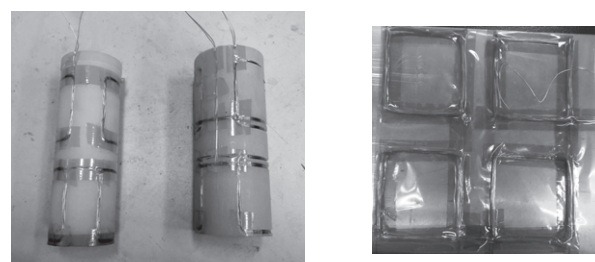
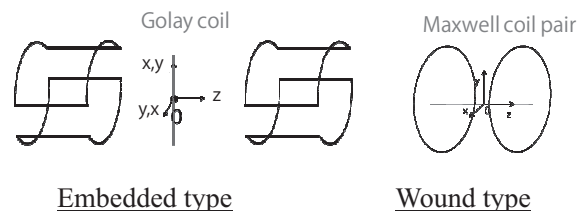


Fig.1 Structure of shim coil and manufacturing

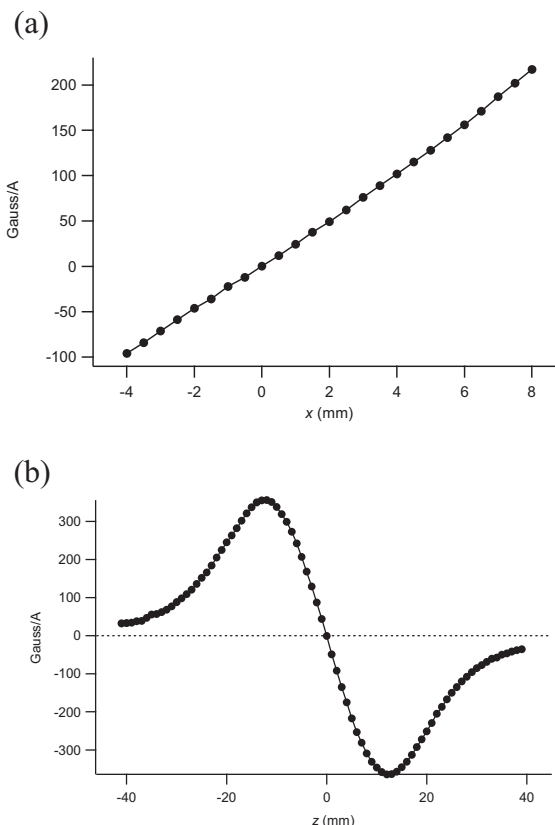


Fig.2 Magnetic field of gradient coil (a)longitudinal coil, (b)transverse coil

(Sm, Eu, Gd)Ba₂Cu₃O_y 超伝導体の空気下による特性評価Characterization of (Sm, Eu, Gd)Ba₂Cu₃O_y Superconductors

松井 健太郎, 村上 雅人(芝浦工大), 井上 和朗(芝浦工大), Miryala MURALIDHAR(芝浦工大)

MATSUI Kentaro, MURAKAMI Masato(SIT), INOUE Kazuo(SIT), Miryala MURALIDHAR(SIT)

Email; mb14031@shibaura-it.ac.jp

1. 緒言

RE123 (RE: 希土類元素)系バルク材料は、高温および高磁界領域においても優れた J_c (臨界電流密度) 特性を有する。希土類半径の大きな RE: La, Nd, Sm, Eu, Gd からなる RE123 材料は、大気中で溶融法によりバルク体を作製すると RE イオンの一部が Ba イオンを置換して RE_{1-x}Ba_xCu₃O_y 型の固溶体を形成し、キャリア濃度が下がり、 T_c (臨界温度) が低下することが知られている。これらの系を低酸素分圧下で溶融凝固させると、RE-Ba 置換が抑制され、 T_c の高いバルク材料を作製できる。このような低酸素分圧に制御された環境下で結晶成長を行う方法を OCMG 法 (Oxygen controlled melt-growth 法) と呼ぶ。この他に、空気下での溶融法があるが、OCMG 法よりもコスト削減になるが、RE-Ba 置換が起きやすくなる[1]。

2. 研究目的

超伝導の技術を実用化するには、 J_c および T_c の向上が不可欠である。NEG 超伝導体は Y 系超伝導体より J_c および T_c の特性が高い。特性向上には OCMG 法が用いられている。しかし、OCMG 法には、再現性がない、費用がかかるなどの欠点がある。空気下での特性向上は、これらの欠点を克服できる利点がある。

イオン半径は Sm より Nd の方が Ba イオン半径に近い。故に、(Nd_{0.125}Eu_{0.125}Gd_{0.75})Ba₂Cu₃O_y (以下 NEG123) の方が (Sm, Eu, Gd)Ba₂Cu₃O_y (以下 SEG123) より RE-Ba 置換が起きやすいと考えられることから、NEG123 より SEG123 の方が、特性が高く出るとはならないかと考えられる。

本研究では、NEG123 と SEG123 をそれぞれの空気下での特性向上の基礎データを取得し、比較することを目的として特性評価を行った。

3. 研究方法

SEG123 は、Gd123, Eu123, Sm123 と Gd211, さらに Pt および CeO₂, BaO₂ を混合した。そして熱伝導率を上げるために Ag₂O を混合した。混合比は (Sm_{0.125}Eu_{0.125}Gd_{0.75}): Gd211: Pt: CeO₂ = 10: 5: 0.5: 1 mol% としている。Ag₂O は 10wt%, BaO₂ は 0mol%, 5mol%, 10mol% で分別した。混合粉を φ20mm の治具で圧粉し、MgO を種結晶として溶融成長させた。その後、酸素アニール処理を行った。600°C を 6 時間で 2 時間保ち、500°C を 12 時間、400°C を 24 時間、300°C を 50 時間で 180 時間という条件で行った。その後、超伝導量子干渉計で J_c , T_c を測定した。

4. 研究結果及び考察

Fig.1 に SEG123 の J_c の磁界依存性を示す。

J_c の値は中でも 5mol% が最も高くなっている。これから SEG123 は BaO₂ を 10mol% 以上添加しても J_c が向上しないことが予想されるので 5mol% から 10mol% の間で調整する必要があると考えられる。0mol% はほとんど 0 に近い値である。ここから空気下の場合、77K では BaO₂ を添加しないと超伝導体にならない可能性があるということが考えられる。また、Fig.2 には

SEG123 の T_c を示しているが、 J_c とは異なり 0mol% と 10mol% の T_c はあまり変わらないことから、SEG123 において BaO₂ は T_c よりも J_c に大きく影響を与えることが考えられる。

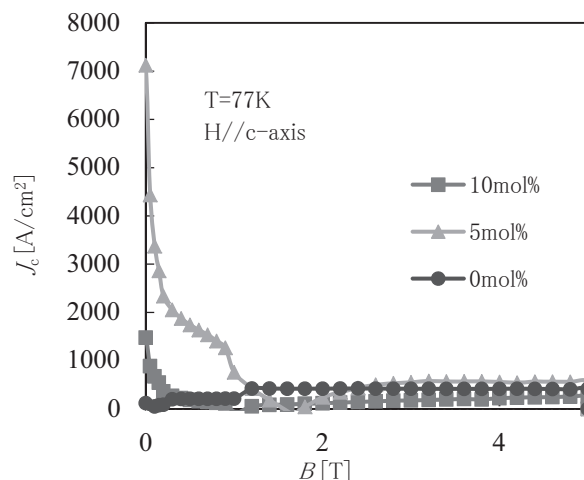


Fig.1 Critical current density of the SEG123

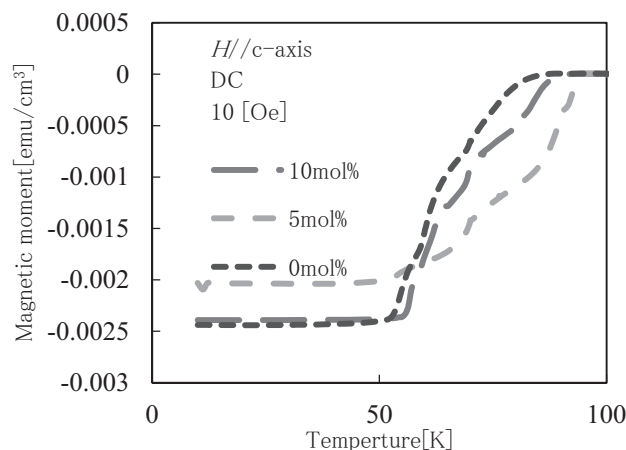


Fig.2 Critical temperature of the SEG123

5. 参考文献

[1] Abstracts of CSJ Conference, Vol. 37 (2002) p.590

小型 NMR relaxometry 装置に用いる高温超伝導バルク体マグネットの磁場均一度向上に関する研究

Numerical study to improve the field homogeneity of HTS bulk magnet for compact NMR relaxometry

宮澤 大輝, 北条 勝也, 野村 亮太, 深田 進, 金 錫範(岡山大学)

MIYAZAWA Daiki, HOJO Katsuya, NOMURA Ryota, FUKADA Susumu, KIM SeokBeom(Okayama University)

E-mail: kim@ec.okayama-u.ac.jp

1. はじめに

近年, 核磁気共鳴(Nuclear Magnetic Resonance : NMR)分光法はタンパク質の機能・構造解析に有効なツールとして注目され, 装置の性能向上が進められている。現在, 装置の高磁場化が進められる一方で装置の大型化, 高コスト化により個人が手軽に使用できる装置とは言えないのが現状である。そこで, 我々は, 要求される磁場強度が 1.5 T(64 MHz)と磁場の空間均一度が 150 ppm であり, 液体窒素温度で運転できる NMR relaxometry 装置の開発を目指した研究を行なっている。

これまでの研究により, NMR relaxometry 装置用マグネットの目標である 1.5 T の磁場強度を発生させることは, 内径 20 mm, 外径 60 mm, 高さ 5 mm のバルク体を積層構造にすることによって[1], 磁場均一度 150 ppm/cm³ は鉄リングによる磁場補正によって達成可能[2]であることが分かっている。しかし, 未だ磁場補正無しでの 150ppm/cm³ は達成できていないことに加え, シムコイルを配置するために 20 mm 以上に内径を増大させることが望ましい。そこで, 本研究では, バルク体の形状最適化を図ることで, 試料測定空間の拡大と, 補正なしでの磁場均一度の向上を図ったのでその結果について報告する。

2. 小型 NMR relaxometry 装置の概要

Fig.1 に開発を目指している小型 NMR 装置の概念図を示す。この小型 NMR 装置は, 高温超伝導バルク体の強力な捕捉磁場を利用するものであり, 超伝導マグネットにより外部から磁場を印加, 冷却を行った後, 外部磁場を取り除く磁場中冷却 (FC) 法により着磁される。着磁された高温超伝導バルク体は, 超伝導マグネットから取り出して NMR 用マグネットとして使用することが可能となるため, 非常にコンパクトになり, 使用が容易となる。

3. 解析方法と結果

本研究では, 厚さ 80 mm のリング型高温超伝導バルク体において, 中心部の試料測定空間を拡大した構造が磁場均一度に及ぼす影響について, それぞれ拡大空間の高さを 5 mm と 10 mm とし, 電磁場数値解析による検討を行った。解析条件として, 0 s で超伝導マグネットに通電を行い, 消磁レート 0.04 T/s で消磁, 3600 s 経過後の磁場をバルク体の捕捉磁場としている。解析モデルを Fig.2 に示し, 解析結果の一例として, 印加磁場を 1.6 T, バルク体の内径と外径の差が 40 mm となるように設定し, 内径が 25 mm から 40 mm まで 5 mm 刻みで変化させた際の試料測定空間である ±5 mm での高さ方向と径方向の磁場均一度を Fig.3 に示す。

内径を拡大させた中央部の高さが 10 mm のモデルについては, 内径 30 mm で最も磁場均一度が向上した後, 磁場均一度が悪化方向に向かっている。これは, 中心部の領域が広がりすぎたことにより, 磁場が高さ方向では凹型に, 径方向では山なりになったためである。高さ 5 mm では内径 40 mm 外径 80 mm, 高さ 10 mm では内径 30 mm 外径 70 mm のモデルにおいて高さ方向, 径方向共に目標とする 150 ppm を達成した。

本研究では, バルク体マグネットの中心部の配置されるバルク体の大きさによる影響について検討したが, 実際の応用においては, 単一バルク体構造は実現するのが難しい。そこで, 各バルク体の厚みが 5 mm から 10 mm の複数をバルク体について検討する必要がある, 今後は, 積層構造のバルク体マグネットの中心部でのバルク体の形状について検討するつもりである。

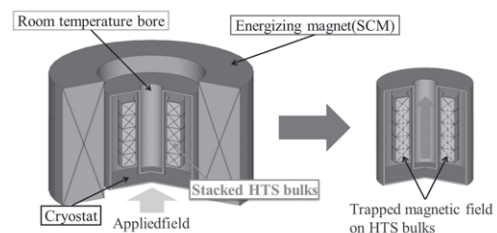


Fig.1 Conceptual scheme of compact NMR relaxometry magnet using stacked HTS bulk annuli magnetized by superconducting magnet (SCM).

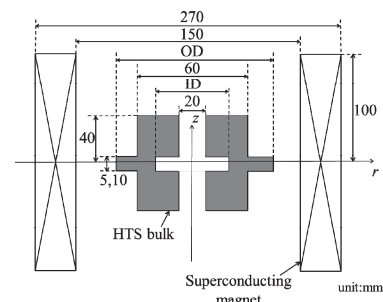


Fig.2 Scaled schematic draw of SCM and modified single HTS bulk model with various ID, OD and thickness at center region.

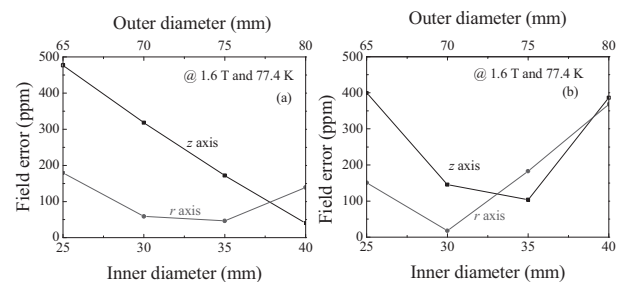


Fig.3 The calculated field homogeneities along ±5 mm in the z-axis and r-axis directions when the thicknesses of center part are (a) 5 mm, (b) 10 mm and various ID and OD.

参考文献

- S.B. Kim, M. Imai, R. Takano, J.H. Joo, S. Hahn: IEEE Trans. Appl. Supercond, vol. 21, no. 3, pp. 2080-2083, 2011.
- S.B. Kim, H. Kitamura, D. Ishizuka, D. Miyazawa: IEEE Trans. Appl. Supercond. vol. 25, no. 3, p.4602204, 2015.

流体力学的手法を用いた超伝導電磁解析

Electromagnetic field analysis of superconductor based on fluid model

紀井 俊輝(京大)

Kii Toshiteru (Kyoto University)

E-mail: kii@iae.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

超伝導体の電磁解析では一般にマクスウェル方程式と超伝導電流と電圧の関係を示す式を連立して解くが、必要に応じて熱拡散方程式や時間依存GL方程式もあわせて用いられる。数値計算の手法としては有限要素法やFDTD法が用いられるが、いずれの場合においても複雑形状の大規模3次元化が課題の一つとなっている。

本研究では、主にバルク超伝導体内部の遮蔽電流分布解析を対象とし、電流界面の解析を流体力学的な考え方に基づく解法について分析を行った。

2. 電磁解析と変分原理

有限要素法によりマクスウェル方程式を離散化し近似解を求めることは、ポテンシャルエネルギーを最小化する(変分原理)ことと等価である。より直接的にエネルギーを最小化する試みとしては、Badiaらによるエネルギー最小化法[1]があり、電流経路をあらかじめ設定しインダクタンスを求め磁気エネルギーが最小となる条件を求めている。有限要素法やエネルギー最小化法を円盤状バルク超伝導体の遮蔽電流解析に適用すると、図1に模式的に示すような電流分布が解として得られるが、解析力学の観点からは磁気エネルギーが最小となるように電流界面が形成されているとして理解できる。

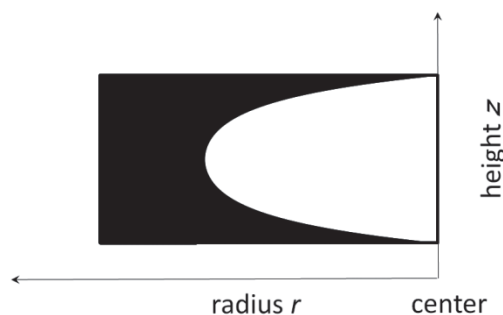


Fig.1 Schematic drawing of distribution of shielding current in a disk shaped bulk superconductor. (Cut view) External magnetic field with z direction is applied. Current distribution is determined to minimize magnetic energy.

3. 流体力学的手法

界面の形状は変分原理に基づき磁気エネルギーが最小となるように決定されているが、図1の黒塗り部分を液体とみなす流体力学的な立場に立つと、液体を構成する粒子がエネルギーが最小となるように配置されているとみなすことができる。

超伝導電流をクーパー対電子の平均的な流れとみなすと、次のように単純化した液体モデルを考えることが可能になる。

- ・ 臨界状態モデルに基づけば、電流密度は臨界電流密度に等しく、非圧縮性の流れとみなせる。マッハ数0.3以下のゆっくりとした速度で電子は移動する。
- ・ 電流経路はバルク超伝導体の形状に沿っており、層流として扱える。レイノルズ数が小さく非粘性流として近似できる。

- ・ 渦なしのなめらかな流れで、速度ポテンシャルにより表現できるポテンシャル流である。

このように、非圧縮性非粘性流の完全流体として近似することが可能となる。

4. 粒子法を用いたモデリング[2]

特に、数値流体力学におけるメッシュフリー解法として知られる粒子法を活用することで、超伝導遮蔽電流界面の大変形に対応した高精度解析が可能になる。ここでは、非圧縮流体を対象に開発されたMPS(Moving Particle Semi-implicit)法を念頭に置き、円盤状バルク超伝導体における遮蔽電流を複数の円形ループ電流とみなした場合について、粒子法を用いた場合の粒子間相互作用とつり合い状態における電磁エネルギーについて考察を行う。

図1のZ軸方向に磁場が印加された場合、ループ電流は常に磁場と垂直な同心円形状を持つ。したがって2次元円筒座標近似が可能であるが、この場合は円電流をリング粒子とし、リング粒子の半径方向の位置が変化する場合に電荷保存則を満たす必要がある。複数の円電流による磁気エネルギーUはL_{ii}およびM_{ij}を自己・相互インダクタンスとすると、

$$U = \sum_i \frac{1}{2} L_{ii} I_i^2 + \sum_{i,j} \frac{1}{2} M_{ij} I_i I_j \quad (1)$$

$$M_{12} = \frac{\mu}{4\pi} \iint_{c1,c2} \frac{\cos \theta ds_1 ds_2}{x} \quad (2)$$

と表現できる。2本の円電流を考えると円電流間の相互作用は、円電流中心間の距離lを微小変化させた時の微小エネルギー変化から

$$F = \frac{dU}{dl} \quad (3)$$

と表現できる。全リング粒子に対して力のつり合いを求め粒子が動かない条件が、エネルギー最小化条件となる。また式3のように円電流間の引力を仕事とエネルギーの関係に表現したことで、流体力学的手法においても、エネルギー最小化条件が磁気エネルギーの最小化条件と厳密に一致することが理解できる。

5. まとめ

超伝導電流を電子の平均的な流れとみなすと、非圧縮性非粘性流の理想流体として取り扱うことが可能になることを示した。今後はモデリングを進め任意の3次元形状や非完全流体モデルへの拡張をめざし、さまざまな超伝導電磁現象の解析を試みる予定である。

参考文献

1. A. Badia, C. Lopez, and J.L. Giordano, "Optimal control model for the critical state in superconductors", Phys. Rev. B 58, (1998) pp. 9440-9949
2. T. Kii, EUCAS2015 3A-LS-P-05.08 (2015)
3. S. Koshizuka, H. Tamako, and Y. Oka, "A Particle Method for Incompressible Viscous Flow with Fluid Fragmentation", Comput. Fluid Dyn. J. 4, (1995) pp 29-46

REBCO コイルの磁化緩和におけるスクライビング効果(2)

Effect of scribing for magnetic relaxation of REBCO superconducting coils(2)

槻木 優樹, 鍋倉 航平, 佐藤 誠樹, 吉田 幸市, 岩熊 成卓 (iSTERA/九大);

和泉 輝郎, 町 敬人, 衣斐 顕 (iSTERA/ISTEC); 富岡 章, 今野 雅行 (iSTERA/富士電機)

TSUKIGI Yuki, NABEKURA Kohei, SATO Seiki, YOSHIDA Koichi, IWAKUMI Masataka (Kyushu Univ.);

IZUMI Teruo, MACHI Takato, IBI Akira (ISTEC); TOMIOKA Akira, KONNO Masayuki (Fuji Electric Co.Ltd)

E-mail: tsukigi@sc.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

近年、MRI 用マグネットへの高温超伝導線材の導入が期待されており、実現すると脱ヘリウムや高磁界化が可能になる。しかし、MRI 用マグネットには空間・時間的に ppm オーダーの均一な安定した磁界が要求されるため、REBCO 線材に誘起される遮蔽電流による磁界の乱れを低減する必要がある。本研究ではレーザースクライビングにより 4 本フィラメントに加工した REBCO 線材を用いて小型テストコイルを作製し、通電時の発生磁界の時間変化を観測した。無分割線材を用いたテストコイルの観測結果と比較・検討することによって、マルチフィラメント化による遮蔽電流の抑制効果を検証した。

2. 実験

IBD-PLD 法により 5mm 幅 30m 長 EuBCO 線材を作製し、レーザースクライビングにより 4 本フィラメント線材に加工した。テストコイルの諸元を Table.1 に示す。これを永久電流スイッチ付き NbTi-3T 超伝導マグネット内に配置し、65-77K のサブクール液体窒素で浸漬冷却して 0.5-2T のバイアス磁界を印加した上で、テストコイルにステップ状に通電した。電流が目標値に到達した後、ホールドしてコイル中心磁界をガウスメーターで観測した。

3. 実験結果

Fig.1 に 65K、外部印加磁界 1T 電流値 80A ホールド時の無分割線材のコイル中心磁界の時間変化を示す。コイル中心磁界は通電電流に追従して、時間とともに増加している。これはテープ面に垂直に印加された磁界により誘起された遮蔽電流が減衰するためである。Fig.2 は 4 分割線材のコイル中心磁界を Fig.1 と同条件で観測したものであり、Fig.1 より早く一定値に漸近している。つまり誘起される遮蔽電流が減少されるとともに、その減衰も速くなっていることがわかる。

4. 解析

磁界変化を定量的に解析するために次式で近似した。

$$B_{\text{center}} = B_0 + B_1 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right) + B_2 t \quad (1)$$

コイルに誘起される遮蔽電流の大きさと減衰する速度はコイルの位置によって異なるため、遮蔽電流が比較的早く減衰する指数の項と緩やかに減衰する直線の項で表している。ここで、 B_0 は電流値が目標値に到達した時($t=0$)の中心磁界であり、直線の傾きである B_2 は線材を 4 分割することにより小さくなる。Fig.3 に各電流値と印加磁界ごとの B_2 を示す。無分割線材の時と同様に、 B_2 は各磁界において I_{op} とともに増加した後 I_c の手前で減少する。今回の研究で用いた 4 分割線材のコイルは効果的に遮蔽電流を減衰させ、さらに I_c 近傍の通電が有効であることが明らかとなった。

謝辞

本研究は、高温超伝導コイル基盤技術開発プロジェクトの一環として、経済産業省及び日本医療研究開発機構の委託により実施したものである。

Table.1 Parameters of EuBCO superconducting test coil.

Winding type	Solenoid (19 turn/layer, 6 layers)
Height of the winding	102 mm
Inner diameter of the winding	80 mm
Outer diameter of the winding	81.8 mm
Bobbin	GFRP
Magnetic field	1.14 mT/A
I_c of the coil at 77 K, self field	140 A (Criterion: $1\mu\text{V}/\text{m}$ (average))
I_c of the coil at 65 K, self field	300 A (Criterion: $1\mu\text{V}/\text{m}$ (average))

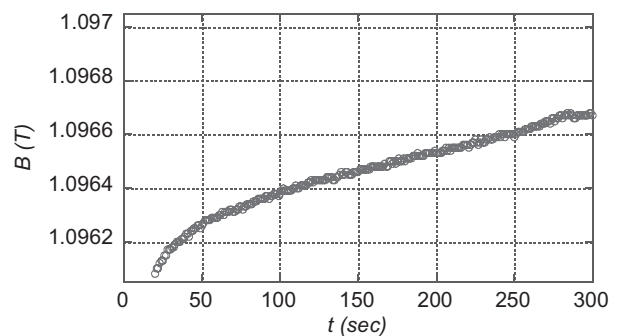


Fig.1 Variation of the magnetic field at the center of a test coil wound with a non-scribed tape.

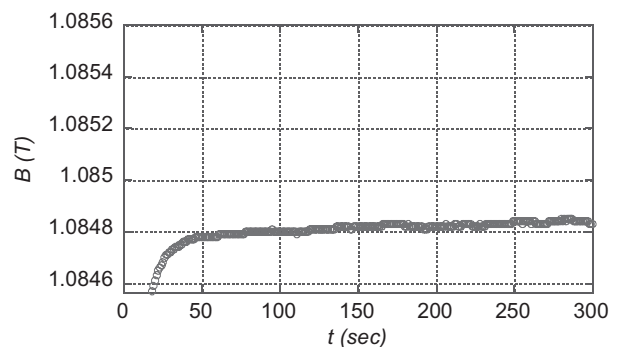


Fig.2 Variation of the magnetic field at the center of a test coil wound with a laser-scribed 4-filament tape.

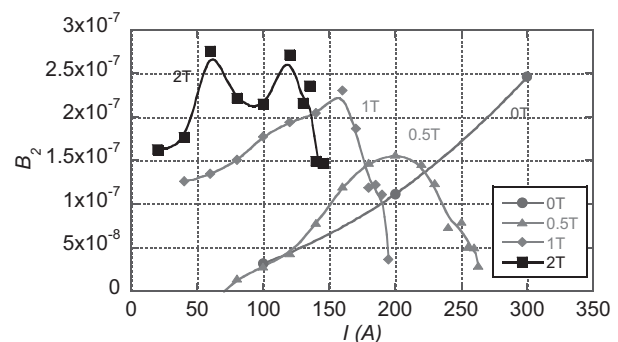


Fig.3 Observed I_{op} dependences of B_2 of the test coil with a laser-scribed 4-filament tape at 65K.

REBCO 超伝導コイルにおける磁化緩和の測定と解析(2)

Measurement and analysis of the relaxation of magnetization in REBCO superconducting coils (2)

鍋倉 航平, 槻木 優樹, 岩熊 成卓, 佐藤 誠樹, 吉田 幸市(九大);
富岡 章, 今野 雅行(富士電機);和泉 輝郎, 町 敬人, 衣斐 顕(SRL)

NABEKURA Kohei, Tsukigi Yuki, IWAKUMA Masataka, SATO Seiki, Yoshida Koichi (Kyushu Univ.);
TOMIOKA Akira, KONNO Masayuki (Fuji Electric Co. Ltd); IZUMI Teruo, MACHI Takato, IBI Akira (SRL)
E-mail: nabekurak@sc.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

現在 REBCO 超伝導線材を用いた MRI 用超伝導マグネットの研究開発が進められており、液体窒素温度での使用や高磁界化といったさらなる発展が期待されている。しかしながら、REBCO 線材幅広面に印加される磁界により誘起された遮蔽電流がマグネット発生磁界を乱し、ppm オーダーの磁界均一性が要求される MRI 用マグネットではこの影響が重大な問題となる。本研究では、まずこの様相を定量的に観測するため、REBCO 超伝導線材を用いて小型テストコイルを試作し、直流バイアス磁界中で通電試験を行い、コイル中心における磁界変化を調べた。さらに磁場を近似式で表し、遮蔽電流減衰時定数についての考察を行った。

2. 実験

試作した REBCO テストコイルの諸元を Table.1 に示す。これを、Fig.1 に示すように別容器に格納して NbTi マグネット内部に配置し、サブクール液体窒素を用いて 65-77K に浸漬冷却した。また、NbTi マグネットは永久電流運転し、0-2T の直流バイアス磁界 B_{dc} を印加した。REBCO テストコイルにはステップ状に輸送電流 I_{op} を与え、目標の電流値に到達した後、約 10 分間その電流値をホールドして、コイル中心磁界をガウスメーターにより観測した。

3. 実験結果及び考察

テストコイルを65Kに冷却し、0.5Tバイアス磁界中で通電した場合のコイル中心磁界の観測結果をFig.2に示す。ここで磁界増加の時定数が遮蔽電流減衰時定数である。通電電流値を60A、110Aと上げるに連れて遮蔽電流の減衰時定数が小さくなる事が分かるが、125Aでは一転して減衰時定数は小さくなっている事が分かる。これらの観測磁場を

$$B_{center} = B_0 + B_1 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right) + B_2 t \quad (1)$$

という式によって近似を行った。 B_0 は $t=0$ の時の磁界、 τ_1 は減衰時定数である。Fig.3は各バイアス磁界で時定数をまとめたものである。これより臨界電流値 I_c に近づくと減衰時定数が小さくなっているが、これは I_c に近づくと等価的に抵抗が発生し、遮蔽電流が速やかに減衰するためだと考えられる。

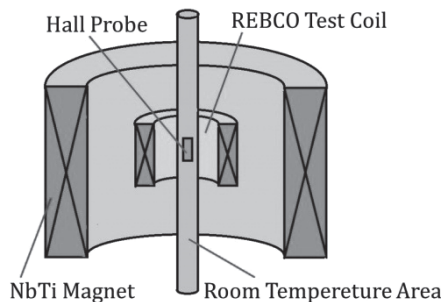


Fig.1 Positional relation between NbTi Magnet and REBCO Sample Coil

Table.1 Specifications of REBCO superconducting coil

Conductor	GdBCO
Tape Width	5mm
Tape length	100m
Inner diameter of coil	78mm ϕ
Height of coil	102
Number of turns	19
Number of layers	20

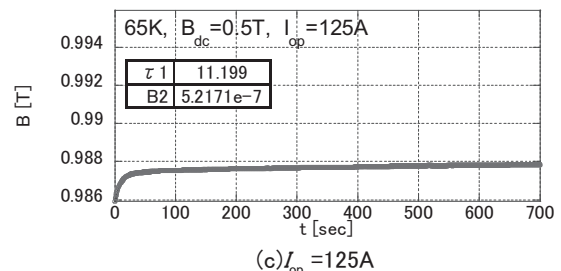
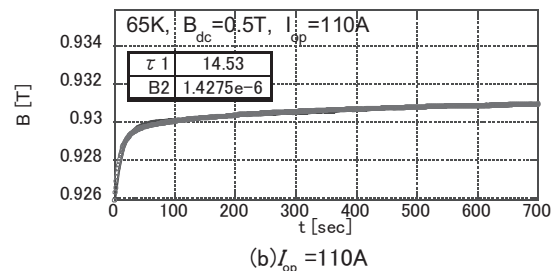
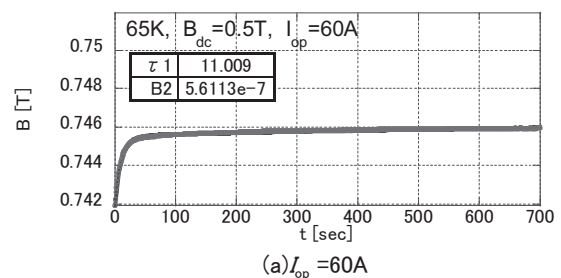


Fig.2 Observed variation of the magnetic field at the coil center of the test coil

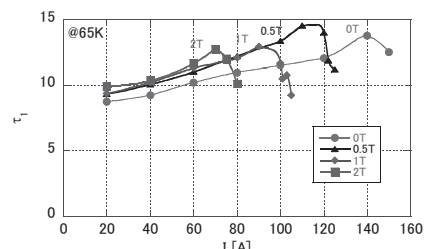


Fig.3 Observed I_{op} dependences of τ_1 of the test coil at 65K and $B_{dc}=0, 0.5, 1$ and 2 T.

謝辞

本研究は、高温超伝導コイル基盤技術開発プロジェクトの一環として、経済産業省及び日本医療研究開発機構の委託により実施したものである。

酸化物超伝導並列導体の通電特性を考慮した電流分流特性の解析(1)

Analysis on the current sharing properties of the oxide superconducting parallelconductors in consideration of the I-V characteristics(1)

本田 正太郎, 河原 史典, 岩熊 成卓(九州大学);
 HONDA Shotaro, KAWAHARA Fuminori, IWAKUMA Masataka(Kyushu-Univ.);
 E-mail:honda-s@sc.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

酸化物超伝導線材を電力機器の巻線や大型超伝導マグネットに適用するためには大電流量化が必要である。現在の酸化物超伝導線材は、結晶の配向性を揃えるためにテープ形状であり、従来の撚線導体構造は適用できず、大電流量化するにはテープを重ね合わせて並列導体を構成しなければならない。しかし、単に積層しただけでは素線間のインダクタンスバランスがとれず、偏流が発生してしまう。そこで適切な位置で素線の位置を入れ替える転位を施すことにより、電流を均等化し、交流損失を低減することができる。

我々はこれまでY系超伝導テープ線材で構成した転位並列導体について、電流リード部の接触抵抗と、n 値モデルに基づく通電時の磁束フロー抵抗を考慮して電流分流の解析を行ってきた。今回、機器応用に向けて、コイル径や並列導体の構成本数等コイルの形状が変化した場合の素線間電流分流について考察したので報告する。また、解析方法を吟味し再度計算を行っている。

2. 数値解析

多層ソレノイドコイルについて、並列導体の素線の数を3本、4本、5本と変化させ、それぞれの場合の素線間電流分流の様相を数値解析により調べた。並列導体には転位を施しており、これまでの研究から判明している最適な転位方法を適用している。各素線の自己インダクタンス及び相互インダクタンスに加え、電流リードとの接触抵抗 R_N と、超伝導素線における磁束フロー抵抗 R_{HTS} からなる抵抗 R_x を考慮にいとると等価回路は Fig.1 で表され、回路方程式は次式となる。

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j\omega L_1 + R_N + R_{HTS1} & j\omega M_{12} & j\omega M_{13} \\ j\omega M_{21} & j\omega L_2 + R_N + R_{HTS2} & j\omega M_{23} \\ j\omega M_{31} & j\omega M_{32} & j\omega L_3 + R_N + R_{HTS3} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix}$$

各素線の磁束フロー抵抗 R_{HTSx} は高温酸化物超伝導線材の通電特性を n 値モデルで近似すると、

$$R_{HTSx} = V/I = V_c (I^{-n} / I_c^{-n})$$

で表される。接触抵抗 R_N には実測値を用いた。

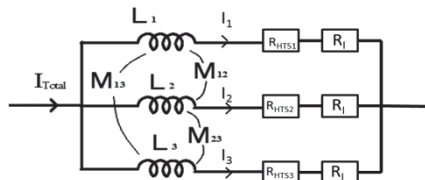


Fig.1 Equivalent circuit of a 3-strand parallel conductor

3. 結果

n=15 各 I_c が 120A,100A,80A の場合の3本並列導体について電流分流比の解析結果をFig.2に示す。低周波では等価抵抗の影響が顕著であり電流がばらついたが、周波数が高くなると電流分流比は均一な値に近づいた。また各素線の n 値

を変化させた場合の解析も行った。例として全素線の n 値を同様に变化させた場合の解析結果を Fig.3 に示す。0.1Hz 程度の低周波数の場合でも、使用している線材の n 値が大きい程、電流分流はより均流に近づいている。

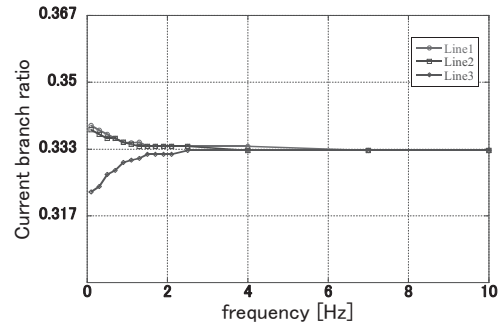


Fig. 2 Frequency dependability (n=15 I_c =120, 100, 80)

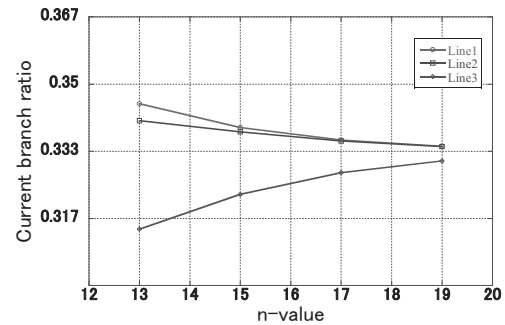


Fig. 3 N-value dependability (I_c =120, 100, 80 f=0.1Hz)

さらにコイル内径、コイル層数、コイルターン数を変化させた場合の電流分流比の解析を行った。n=15、周波数が 0.1Hz、各 I_c が 110A,100A,90A の場合の3本並列導体におけるコイル内径依存性を Fig.4 に示す。低周波の 0.1Hz 程度ではコイルの内径が大きくなるほど磁束フロー抵抗の影響が支配的であり電流のばらつきが大きくなっている。他の場合における電流分流の様相については当日報告する。

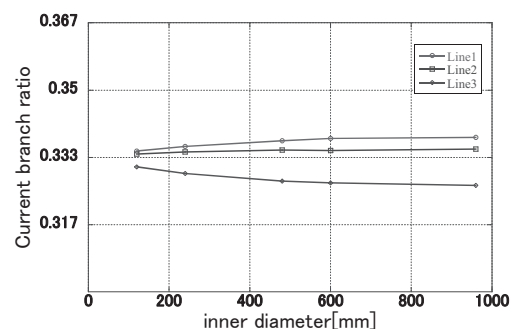


Fig. 4 Inner diameter dependability (n=15 I_c =110, 100, 90 f=0.1Hz)

共巻き導体法による REBCO コイルのクエンチ電圧検出

Quench Detection for the REBCO Coil by means of the Co-winding Method

高木 智洋 (古河電工); 中山 大樹, 有山 隆紘, 高尾 智明, 塚本 修巳 (上智大)
 TAKAGI Tomohiro (Furukawa Electric); NAKAYAMA Daiki, ARIYAMA Takahiro, TAKAO Tomoaki,
 TSUKAMOTO Osami (Sophia Univ.)
 E-mail: takagi.tomohiro@furukawa.or.jp

1. はじめに

超電導コイルにとって、クエンチ保護は避けて通ることのできない課題である。コイルは電流変動や外部磁場変動によって誘導起電力を発生させるため、クエンチの前兆である微弱なフラックス・フロー電圧を早期に検出することが難しいという問題がある。誘導起電力をうまくキャンセルさせてフラックス・フロー電圧のみを検出する手法として、ブリッジ回路法と共巻き導体法がある。テープ型の HTS 線材は多くの場合ダブルパンケーキコイルに巻かれて用いられ、ブリッジ回路法では通常両パンケーキコイルの間でブリッジ回路を構成してその誘導起電力をキャンセルさせる。ところがこの場合、両パンケーキコイルに異なる外部磁場が印加されると、その変化により生み出される誘導起電力をうまくキャンセルすることができない。一方共巻き導体法ではこのような問題はないとされる。

本研究では REBCO 線材を用いて試験用のダブルパンケーキコイルを作製し、これに非対称な外部磁場を印加してブリッジ回路法と共巻き導体法で検出される電圧の評価を行った。さらにそれぞれの手法で実際にクエンチの前兆検出実験を行った。本発表ではそれらについて報告する。

2. 実験方法

Super Power 社製 REBCO 線材を用いてダブルパンケーキコイルを作製した。ターン間絶縁の役割も兼ねた絶縁テープ導体線を共巻きしている。線材の総延長は 28m で、コイルの内径 ϕ 120mm、外径 ϕ 136mm、ターン数は両パンケーキコイルとも 35 である。実測されたインダクタンスは 1.1mH であった。

このダブルパンケーキコイルを 85 ターンの銅条パンケーキコイルと重ね合わせ、銅条パンケーキコイルに交流電通することによって HTS ダブルパンケーキコイルに非対称な振動外部磁場を印加した。このコイル系の俯瞰写真を Fig.1 に示す。

さらにダブルパンケーキコイルには第 12 ターンの一部を加熱するためのヒーターが内蔵されており、ダブルパンケーキコイルを定電流通電した状態でこのヒーターを加熱することにより、コイルに模擬的なクエンチを引き起こすことができる。また本ダブルパンケーキコイルはインダクタンスが小さいためごく短い時間で消磁することができるが、大規模なコイル系のクエンチ挙動を模擬するためクエンチの前兆を検出した際には指定された時定数による指数関数的な消磁を行う。先述の非対称振動外部磁場が印加された状態で模擬クエンチを発生させ、その時のコイル電圧の挙動を測定した。

3. 結果と考察

まずは外部磁場を印加しない状態で HTS ダブルパンケーキコイル自身の通電電流を変調させ、この時の誘導起電力がキャンセルされるように両パンケーキ間のブリッジ回路を調節した。この段階でブリッジ回路による測定電圧における誘導起電力のキャンセル率は 1/100、一方共巻き導体法によるキャンセル率は 1/2000 であった。ブリッジ回路は可変抵抗を含んでおり、その調整によって両パンケーキコイルのインダクタンスの差を補正できるが、誘導起電力の 1% 程度、およびコイル電源に由来する電圧ノイズを打ち消すことができなかった。

次に HTS コイルは定電流で駆動して非対称振動外部磁場を印加したところ、ブリッジ回路電圧の誘導起電力キャンセル率は 1/12 に低下した。一方、共巻き導体法により測定された電圧からは有意な誘導起電力成分が検出されなかった。さらにこの状態でヒーターを加熱したところ、共巻き導体法ではノイズの干渉を受けることなく 100 μ V のフラックス・フロー電圧を検出でき、その結果クエンチを未然に防ぐことに成功した。

4. 結論

絶縁テープ導体線を共巻きにした HTS ダブルパンケーキコイルを作製し、両パンケーキコイルに非対称な振動外部磁場を印加した。両パンケーキコイルで構成したブリッジ回路では非対称な外部磁場の変化により生じる誘導起電力を完全にキャンセルできず、全体の 8% 程度の電圧がノイズとして検出されてしまったのに対して、共巻き導体法ではノイズの干渉を受けることなく 100 μ V のフラックス・フロー電圧を検出でき、その結果クエンチを未然に防ぐことに成功した。

5. 図表

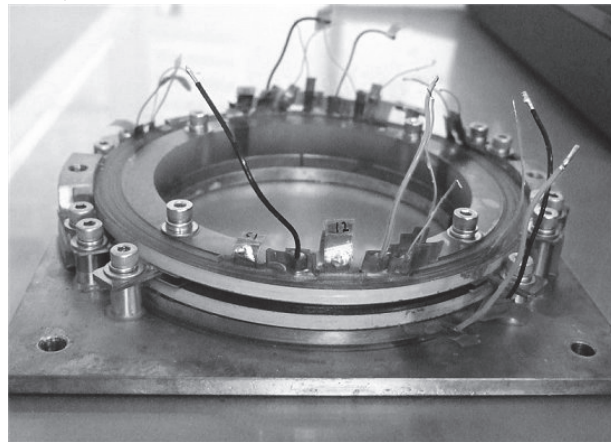


Fig.1 Bird view of the coil system.

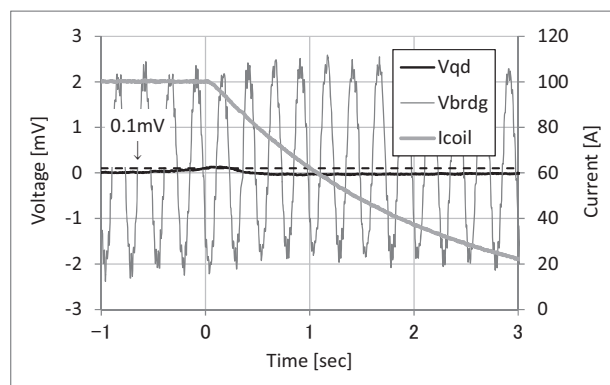


Fig.2 The bridge voltage and the co-winding voltage. "Vqd" and "Vbrdg" represent the co-winding voltage and the bridge voltage, respectively.

m級無絶縁 REBCO パンケーキコイルの基礎特性評価： 局所的常電導転移の検出法に関する提案

Evaluation on Basic behaviors of meter-class no-insulation REBCO pancake coil:
A proposal on the detection method for normal-state transition

王 韜, 賈 昀昊, 勝俣 一輝, 池田 愛花, 大木 隆広, 石山敦士(早大); 野口 聡, 門馬 克敏(北大);
渡辺 智則, 長屋 重夫(中部電力)

WANG Tao, JIA Yunhao, KATSUMATA Kazuki, IKEDA Aika, Ohki Takahiro, ISHIYAMA Atsushi (Waseda University);
NOGUUCHI So, MONMA Katsutoshi (Hokkaido University); WATANABE Tomonori, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power)
E-mail: michealwang@aoni.waseda.jp

1. はじめに

我々は電気絶縁を施していない超電導線材で巻線を行う「無絶縁コイル」を用いて、MRI 用高温超電導コイルシステムの高性能化・小型化の可能性を検討している。無絶縁コイルは、二律背反の関係にある高電流密度化と高熱的安定化を両立する技術として期待されている。

超電導コイルの実運転においては、コイル巻線内の常電導転移事故を正確に早期検出し、速やかにコイルに蓄えられている磁気エネルギーを回収して巻線内の温度上昇を抑える必要がある。しかし無絶縁コイルの場合、常電導転移発生時の巻線内電流分布は極めて複雑であり、また、従来の常電導抵抗発生に伴う電圧検出法をそのまま利用することは困難と考えられる。そこで、局所的常電導転移発生時の無絶縁コイル巻線内の電流分布変化に伴う発生磁場の変化に着目し、これをピックアップコイルにより検出する方法について検討してきた¹⁾。今回は、全身用MRI応用を想定したm級無絶縁パンケーキコイルを対象として、筆者らが開発したPEECモデルに基づく電流分布解析²⁾により、2つの異なる形状のピックアップコイルについて評価したのでその結果を報告する。

2. 解析条件および解析方法

今回想定したm級実規模無絶縁パンケーキコイルの諸元をTable.1に示す。パンケーキコイルは、幅4mm、厚み63 μm (銅安定化層厚み:5 $\mu\text{m}/\text{side}$)のREBCOテープ線材が270ターン巻かれているものとした。臨界電流値を42A、負荷率70%($I_{op}=30\text{A}$)で運転されているものとし、一定電流運転状態において、巻線内50層目と51層目の境目で常電導転移(PEECモデル1要素分の長さ74mmにわたって I_c がゼロになったと仮定)が発生したとした。また、無絶縁コイルの層間接触抵抗は、先行研究³⁾で得られた70 $\mu\Omega\cdot\text{cm}^2$ を使用した。

以上の解析条件に基づき、PEEC解析により求めた電流分布から発生する変動磁場を計算し、今回は、Fig1(a)のコイル中心に置いた円形ピックアップコイルと、Fig1(b)のコイル巻線上に設置した扇型ピックアップコイルの2つについて誘導される電圧を求めた。

3. 解析結果および考察

Fig.2とFig.3に、それぞれ円形ピックアップコイルと扇型ピックアップコイルの1ターン分に誘導される電圧の時間変化を示す。今回の解析モデル・条件においては、円形ピックアップコイルに誘導される電圧の方が大きく、また、扇型ピックアップコイルに誘導される電圧の円周方向の設置位置による差がほとんど見られないという結果になった。円形ピックアップコイルの場合は、劣化が生じた箇所を中心とする巻線内全体の電流分布の変化の影響を捉えることができるのに対して、扇型ピックアップコイルの場合は、一部の電流変化による磁場変化のみを捉えているために誘導電圧が小さく、また、常電導転移発生と同時に、電流が、劣化の生じた層の全周にわたって隣接する層に転流するため、扇型ピックアップコイルの位置による差が生じなかったものと考えられる。

Table. 1 m級実規模無絶縁 REBCO パンケーキコイルの諸元

内直径 (m)	1
外直径 (m)	1.034
高さ (m)	0.004
巻数	270
コイルの臨界電流@77K (A)	42
コイルの運転電流 (A)	30 (負荷率 70%)
自己インダクタンス (mH)	204.8
蓄積エネルギー (J)	92.16
使用線長 (m)	862.6

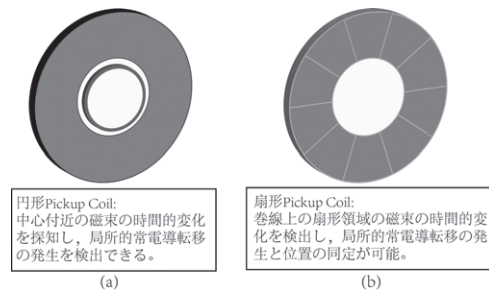


Fig.1 ピックアップコイルの概念図

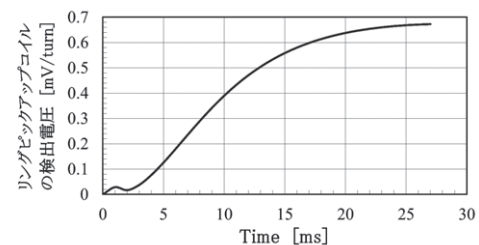


Fig.2 常電導転移発生後の円形ピックアップコイルにおける検出電圧の変化

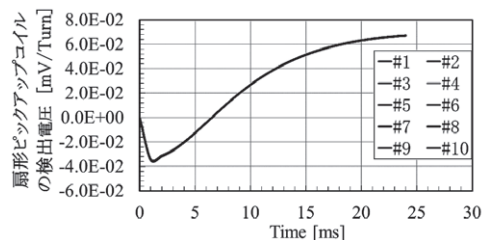


Fig.3 常電導転移発生後の扇形ピックアップコイルにおける検出電圧の変化

本研究は、平成27年度科研費基金若手研究B(No. 26820101)「高電流密度・高熱的安定性が両立する高温超電導コイルシステムの開発」によることを付記する。

参考文献

1. Y. Jia, et. al.; Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 91 (2015), pp. 131.
2. T.Wang, et al.; "Analyses of transient behaviors of No-Insulation REBCO pancake coils during Sudden Discharging and Over-Current", IEEE trans on Applied Supercond., Vol. 25, Issue 3, 2015
3. X.Wang, et al.; "Turn-to-turn contact characteristics for an equivalent circuit model of no-insulation REBCO pancake coil", Supercond. Sci. Technol., Vol. 26 (2013) 035012

200m 高温超伝導直流送電ケーブルの通電試験中臨界電流測定及び電流分布 Critical current measurement and current distribution for 200 m HTS dc power cable during transport current feeding test

孫 建(中部大);宮田 成記(玉川大);山内 健吾, 佐藤 裕貴, 張 ヨドン, Tallouli Mohamed, 浜辺 誠, 渡辺 裕文, 河原 敏男, 築本 知子, 井上 徳之, 高野 廣久, Ivanova Yuri, 山口 作太郎(中部大)

SUN Jian (Chubu Univ.); MIYATA Seiki (Tamagawa Univ.); YAMAUCHI Kengo, SATO Yuki, ZHANG Yudong, TALLOULI Mohamed, HAMABE Makoto, WATANABE Hirofumi, KAWAHARA Toshio, CHIKUMOTO Noriko, INOUE Noriyuki, TAKANO Hirohisa, IVANOVA Yuri, YAMAGUCHI Satarou (Chubu Univ.)

E-mail: j_sun@isc.chubu.ac.jp

1. Introduction

A 200 m HTS dc power cable test facility was constructed at Chubu University for performance evaluation in 2009 [1], which is called as the CASER-II. We have performed six cooling cycle tests on a 200-meter high temperature superconducting dc power cable system located at Chubu University for performance evaluation. After cooling down to liquid nitrogen temperature, the cable was kept below 77 K by circulation of coolant liquid nitrogen through a cryogenic system and then dc transport currents are applied to the cable for the current feeding tests. In this report, we will present the current distributions and the critical current measurements in the 200 m HTS dc power cable during current feeding tests.

2. CASER-II cable

The CASER-II cable system has a liquid nitrogen circulation system with a cooling power of 1 kW at 77 K. The HTS cable is cooled by liquid nitrogen and mounted into a thermos vacuum insulated double straight pipes. The HTS cable has three layers in a coaxial structure. BSCCO tapes from Sumitomo Electric Industry (SEI) are used with type of HT-CA ($I_c = 160$ A, 77 K). As for DC power transmission lines, the bipolar current is transported through the coaxial cable. Each tape is connected to the current leads separately as in Fig.1. All the physical signals are obtained by a 600-channel measurement system [2].

3. Experimental procedures and results

In the summer of 2014, we started the sixth cooling cycle test on the 200-meter cable. After cooling down to liquid nitrogen temperature, we applied a dc transport current to the cable. During the current feeding tests, the temperature difference along the cable is less than 1.5 K. In the experiment, three dc power supplies with maximal output current of 3.72 kA are used in parallel [3]. Since HTS tapes are separately connected to the current leads and each I-V curves can be obtained. Fig. 2 shows the measured waveforms of current and voltage for HTS tape No. 1 and the inset shows responding I-V curve. The critical current of tape No.1 is 196 A. We found that the critical current becomes larger than 160 A resulting from lower temperature (~ 75 K) and magnetic field interactions. Fig. 3 presents the current distributions for each HTS tape at the total current of 1 kA and 2 kA. The unbalance current distributions are observed between the tapes, which would affect the property of the HTS cable.

参考文献

1. S. Yamaguchi, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 80 (2009) p.272

2. J. Sun, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 82 (2010) p.90
3. J. Sun, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 91 (2015) p.108

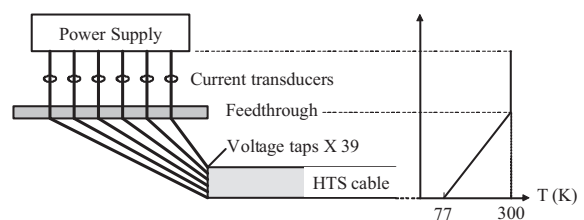


Fig.1 Connections between the power supply and current leads for each HTS tape separately

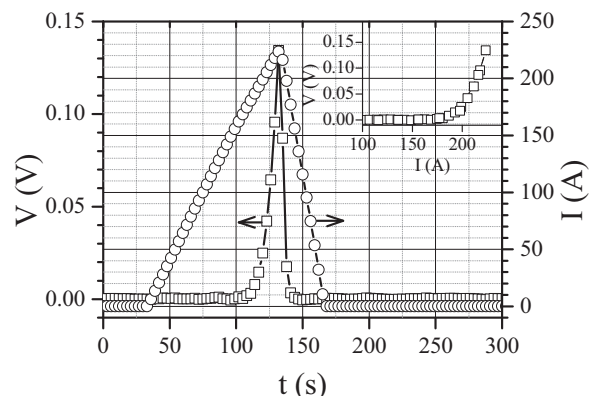


Fig.2 Measured voltage and current waveforms for tape No. #1 with its I-V curves in the inset.

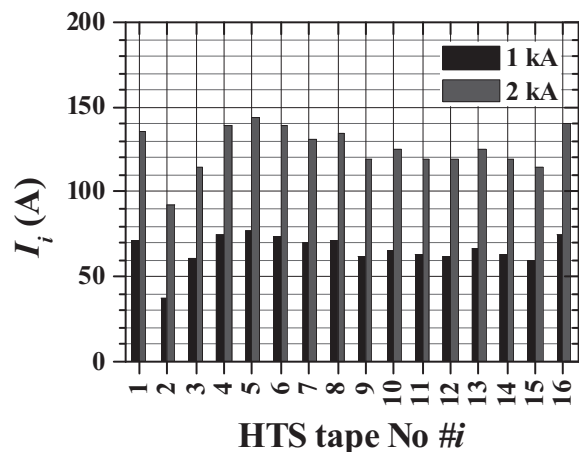


Fig.3 Measured current distributions for each HTS tapes at the total current of 1 kA and 2 kA.

スタック状に構成した超電導ケーブルの臨界電流特性評価 Critical Current Properties of HTS Twisted Stacked-Tape Cable

富田 優, 福本 祐介, 石原 篤, 鈴木 賢次, 赤坂 友幸, 小林 祐介, 前田 淳(鉄道総研); 高安 真(MIT)
Tomita Masaru, Fukumoto Yusuke, Ishihara Atsushi, Suzuki Kenji, Akasaka Tomoyuki, Kobayashi Yusuke, Maeda Atsushi (RTRI);
Takayasu Makoto (MIT)
E-mail: tomita@rtri.or.jp

1. はじめに

鉄道総研では、直流電気鉄道の電力システムの合理化および省エネルギー化を目的として、超電導き電ケーブルの開発を進めている[1]。超電導ケーブルを鉄道の送電線に適用することで、回生効率の向上、電力損失の低減、変電所間の負荷平準化や電圧降下の低減による変電所集約化、電圧補償や電食の抑制などが期待できる。

超電導き電ケーブルは鉄道沿線への敷設を想定しているが、変電所からの引き出し口などにおいて、急激な曲げ半径が要求される。本講演では、そのような箇所への適用を想定し、複数枚の超電導線材をスタック状に構成した超電導ケーブル(TSTC: Twisted Stacked-Tape Cable)について臨界電流特性を評価したので報告する。

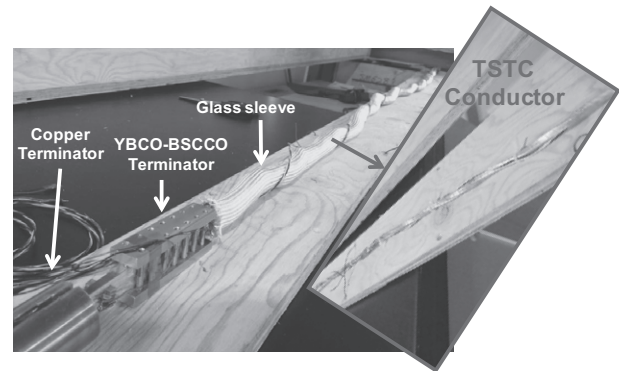


Fig.1 TSTC Conductor

2. TSTC

TSTCの外観をFig.1に示す。長さは2mであり、4 mm幅のY系超電導線材($I_c=85\text{A}$ at 77K in self-field)を32枚積層し、200mmのピッチでツイスト加工を施している。フォーマを使用しないため小型化が実現でき、小さな曲げ半径が期待できる[2]。また、端部は、Bi系超電導線材を用いて電流端子と接続し、接続抵抗を極力抑える構造とした。

3. 通電試験

TSTCを低温容器内に配置し、液体窒素により浸漬冷却した後、容器内の圧力調整により温度を85~64 Kとし、各温度について臨界電流を測定した。測定結果をFig.2に示す。電圧タップは試料の4,16,17,29層目に取り付けており、それぞれのI-V曲線がほぼ一致しているため、各線材に均等に通電できていることが確認できた。臨界電流値は、85 Kで420 A、77 Kで1400 A、64 Kで3600 A程度であった。

Fig.3に実験値と解析値の比較を示す。解析は、自己磁場の影響を考慮し、超電導線材の I_c -B特性とロードラインにより1枚あたりの臨界電流値を導出し、枚数(32枚)分積算することで求めた。実験値と解析値は、ほぼ一致したが、最大で15%の誤差となった。この誤差は、超電導線材の個体差によるものであり、超電導線材へのダメージなく巻線できていると考えられる。

今後、鉄道への適用のため、最適構造および大電流量容量化について検討を進める計画である。

参考文献

1. M. Tomita, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol.90(2014) p.25.
2. M. Takayasu, et al.: IEEE Trans. Appl. Superconduct, 23, no. 3, 4800104, 2013.

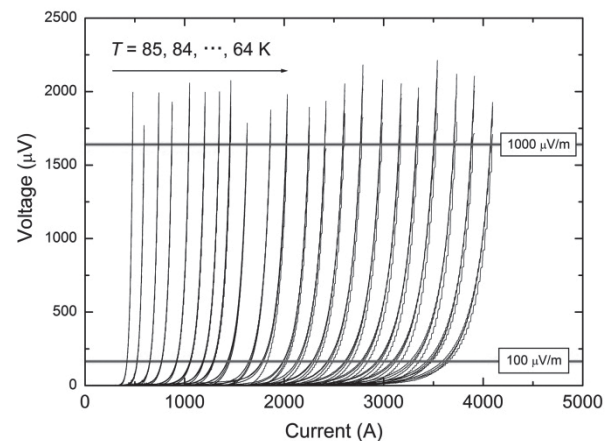


Fig.2 I-V curve of TSTC conductor

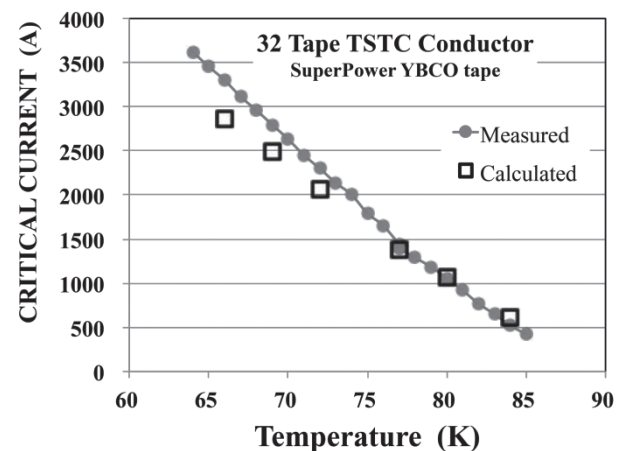


Fig.3 Calculated temperature dependence of I_c

直流電気鉄道の子電系に対する超電導ケーブル導入に要求される構造および冷却システムの検討

Study on Superconducting Power Cable Structures and Cooling Systems for a DC Electric Railway Feeding System

熊谷 大輔, 大崎 博之(東大); 富田 優(鉄道総研)

KUMAGAI Daisuke, OHSAKI Hiroyuki (Univ. of Tokyo); TOMITA Masaru (RTRI)

E-mail: kumagai@ohsaki.k.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

直流電気鉄道の子電系で課題となっている電圧降下や回生失効への対策として、直流超電導ケーブルの導入が期待されている。しかし、超電導ケーブルは液体窒素温度で使用しなければならないため、ケーブル全体が一定以下の温度に保たれ、運用における安全性・信頼性を保証する必要がある。本研究では冷媒流路の構造や冷却システムの変更などを行いながら解析を行い、導入可能性の検討を行った。

2. 超電導ケーブル構造・熱解析モデル

本研究ではGo-Return型の冷却方式を採用した超電導ケーブルを想定し、両端に冷凍機を設置することにより、70 K一定で冷媒が送り出されるものとする。冷媒流路としては、Fig. 1に示されるような流路構造を想定し、断熱管内管までをモデル化している。圧力損失の低減のため、流路断面積を変化させた2種類の構造(Structure 1, Structure 2)を考え、それぞれの構造に対して圧力損失や外部からの侵入熱を計算している[1]。構造や侵入熱に関しては Table 1 に示される値を用いている。また、ケーブル長さは 4.1 km とし、熱源は外部からの侵入熱と圧力損失による発熱のみを考えて、解析を行った。

3. 解析結果

Fig. 2 に圧力損失解析の結果を示す。また、Structure 1 と Structure 2 に対して行った温度分布解析の結果を Fig. 3 と Fig. 4 に示す。1.0 MPa の差圧を生じさせるポンプの使用を想定し、ケーブルの片側の冷媒送り出し部に 1 つ設置した場合と、両側に 1 つずつの合計 2 つを設置した場合について解析した結果を示している。流路面積を大きくすることで圧力損失が低減され、今回設定した差圧では Structure 2 程度まで流路を拡大することで、十分な冷却が可能となる結果となった。

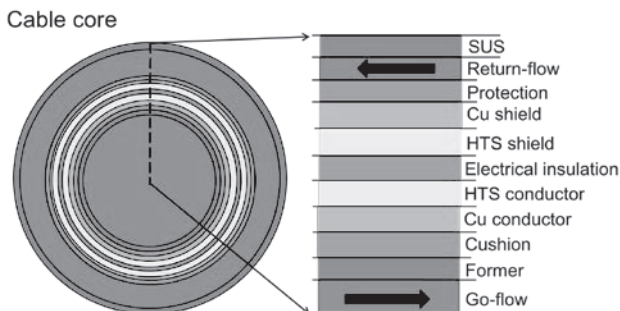


Fig. 1. Structure of the superconducting cable model.

Table 1. Parameters of the superconducting cable models.

	Structure 1	Structure 2
Radius of go-flow (mm)	23.0	36.5
Internal radius of return-flow (mm)	35.0	47.3
External radius of return-flow (mm)	48	68.5
Diameter of the cable (mm)	139	180
Heat invasion (W/m)	1.36	1.96

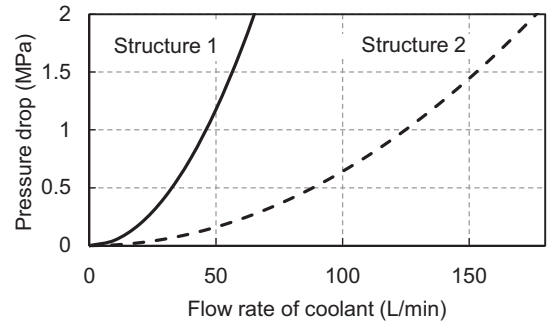


Fig. 2. Pressure drop of superconducting cables.

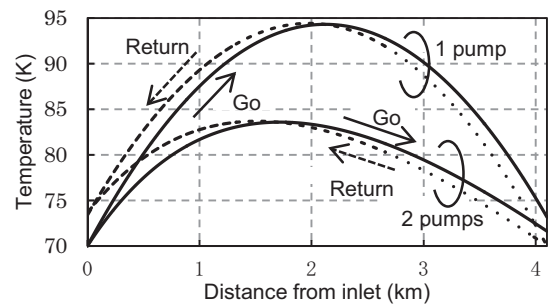


Fig. 3. Temperature distribution of go-flow and return-flow in superconducting cables (Structure 1).

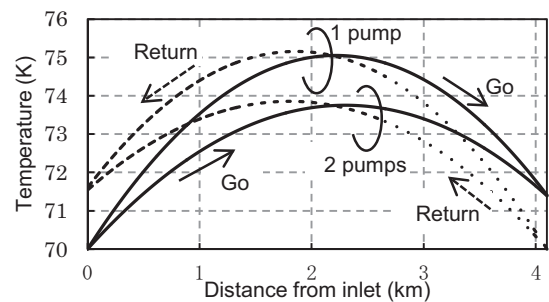


Fig. 4. Temperature distribution of go-flow and return-flow in superconducting cables (Structure 2).

4. まとめ

本研究では超電導ケーブルの流路構造による圧力損失の変化と、温度分布へ及ぼす影響に関する解析を行った。

本研究の一部は科学技術振興機構(JST)の産学イノベーション加速事業[戦略的イノベーション創出推進]の支援によって行われた。

参考文献

1. H. Ohsaki, D. Kumagai, and M. Tomita: "Thermal and Cooling Characteristic Analysis of a Superconducting DC Power Cable for Railway Application", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol.25, No.3 (2015)

66kV 級 40m 高温超電導ケーブルの短絡電流通過時における冷却システムを含めた冷媒の挙動解析

Coolant Behavior Analysis with Short-circuit Current Accident on 40 m HTS Cable for 66 kV Transmission Lines with Cooling System.

竹田 夏子, 安井 鉄郎, 横尾 祐輔, 香村 祐美, 我妻 洸, 石山 敦士(早稲田大学); 王 旭東(KEK); 大屋 正義, 増田 孝人(住友電気); 本庄 昇一(東京電力)

TAKEDA Natsuko, YASUI Tetsuo, YOKOO Yusuke, KOMURA Yumi, AGATSUMA Koh, ISHIYAMA Atsushi (Waseda University); WANG Xudong (KEK); OHYA Masayoshi, MASUDA Takato(SEI); HONJO Shoichi(TEPCO)
E-mail: atsushi@waseda.jp

1. はじめに

高温超電導ケーブルは電力輸送の高密度化と低損失化という特性を兼ね備えていることから、将来の電力輸送システムの拡充という課題に対する解決策として期待されている。しかし、実用化に向けては短絡事故電流の通過時における安全性確保が必要不可欠であるため、我々はケーブルの導体温度及び冷媒液体窒素の温度・圧力を計算する数値解析プログラムの開発を行ってきた[1,2]。本研究では、ケーブルだけでなく冷却システムまで考慮した短絡電流通過時の冷媒挙動解析を行ったので報告する。

2. モデルケーブルの解析条件

図1に示す冷却システムを考慮した循環ポンプモデルにより、冷媒温度や電流等を変化させて、短絡電流通過時における冷媒の圧力・温度変化を解析した。

図1に示すA端, B端, リザーバータンク, ポンプ吐出部分の各圧力は、液体及び気体の変化量を用いた以下の式で計算した[2]。

$$P = \frac{P_0(1 + \Delta V_{gas}/V_0)}{(1 - \Delta V_{liq}/V_0)} \quad (1)$$

ここで、 P_0 は初期圧力、 ΔV_{gas} は気体変化量、 ΔV_{liq} は液体変化量、 V_0 は初期気体体積とした。また質量流量は隣合う端末部の差圧を用いて以下の式から導出した。

$$g = \sqrt{\frac{\Delta P \rho De}{2fdl}} \quad (2)$$

但し、 ΔP は端末間の圧力差、 ρ は冷媒密度、 De は水力直径、 f はファニング摩擦係数、 dl は要素長とした。

超電導ケーブル本体の冷媒の物性値は、流体の2つの入力パラメータ(圧力、温度、密度、エンタルピー等)を用いて他のパラメータを出力するコンピュータプログラムであるGASPAKを用いて導き出した。今回エンタルピー H 及び圧力 P を入力パラメータとして、それぞれ式(3)式(4)を用いて毎時間・毎要素ごとに導き出した。

$$\Delta H = H_{(n,t+\Delta t)} - H_{(n,t)} = \Delta t \left\{ \frac{(2Q_{ht(n,t)} + Q_h)dl}{V\rho_{(n,t)}} + \frac{v_{(n,t)}}{dl} (H_{(n-1,t)} - H_{(n,t)}) \right\} \quad (3)$$

$$P_{(n,t)} = P_{(n-1,t)} - \frac{2f\rho_{(n-1,t)}\{v_{(n-1,t)}\}^2 dl}{De} \quad (4)$$

ここで、 V は冷媒体積、 v は冷媒の流速、 Q_{ht} はケーブル壁面における強制対流伝熱、 Q_h は外部からの侵入熱とした。

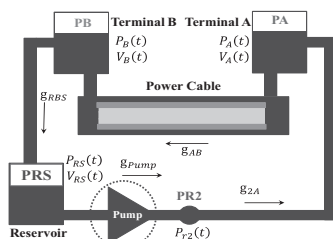


Fig.1 Pump Circulation Model

3. 解析結果

このモデルを用いた解析結果の一例を以下に示す。A 端の初期圧力を 300kPa、冷媒温度初期値を 70K、ポンプの初期流量を 40L/min とした。図2は各部の質量流量の変化を示したグラフである。B 端とリザーバータンク間の質量流量が顕著に増加することがわかる。また図3は時間経過に伴う超電導ケーブル内長手方向冷媒温度変化を示したグラフである。入口付近の冷媒から徐々に温度が低下していき、短絡事故発生から約 200s 経過するとケーブル出口部に新鮮な冷媒が到達し出口部の温度が下降していくことが分かる。

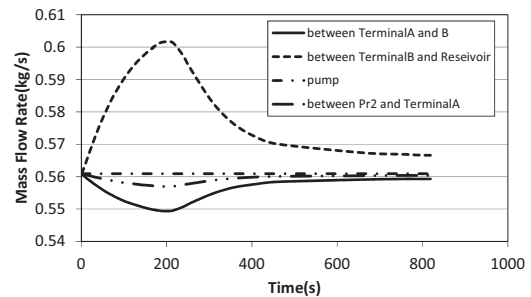


Fig.2 Calculation Result (Time-Mass Flow Rate)

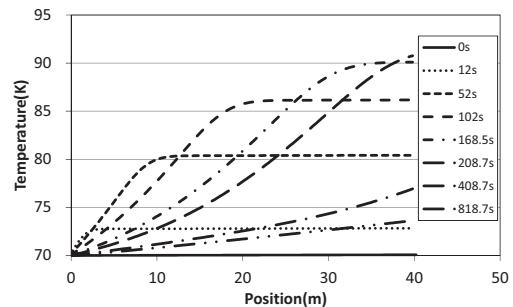


Fig.3 Calculation Result (Position-Temperature)

4. 今後の予定

本研究では冷却システムを考慮した循環ポンプモデルを用いて各部の圧力変化及びケーブル内の温度解析を行った。今後は住友電気工業株式会社・熊取試験場で実施される40m ケーブル模擬試験の結果と解析結果を比較し、プログラムの改良を進めていく。

謝辞

本研究は、「次世代送電システムの安全性・信頼性に係る実証研究」の一環としてNEDOの助成により実施した。

参考文献

- M.Furuse, S.Fuchino, K.Agatsuma, et al.: IEEE Trans. On Applied Superconductivity, Vol. 21 (2011) p.1021
- Y.Sato, T.Yasui, K.Agatsuma, et al.; Abstracts of CSSJ Confedence, Vol.90(2014)p.22

実規模級 HTS ケーブルの短絡電流通過時における AC ロス・誘電損失・ジョイント部ジュール損を考慮した冷媒温度・圧力解析 Coolant Temperature and Pressure Simulation on Short-circuit Current Accident in Practical Class HTS Cable Considering AC Loss, Dielectric Loss, and Joule Loss at Intermediate Joint

横尾 祐輔, 安井 鉄郎, 竹田 夏子, 香村 祐美, 我妻 洗, 石山 敦士(早稲田大学); 王 旭東(KEK);
大屋 正義, 増田 孝人(住友電工); 本庄 昇一(東京電力)

YOKOO Yusuke, YASUI Tetsuo, TAKEDA Natsuko, KOMURA Yumi, AGATSUMA Koh, ISHIYAMA Atsushi (Waseda University);
WANG Xudong (KEK); OHYA Masayoshi, MASUDA Takato(SEI); HONJO Shoichi(TEPCO)

E-mail: atsushi@waseda.jp

1. はじめに

高温超電導ケーブルのもつ電力輸送の高密度化と低損失化という特性は将来の電力輸送システムの拡充という課題に対する解決策として期待されている。しかし、実システムに適用するには、短絡電流通過時の安全性確保が必要不可欠である。我々は高温超電導ケーブルの導体温度及び冷媒の温度・圧力を計算する数値解析プログラムの開発を行ってきた。本研究では、先行研究において開発した解析プログラム[2]に AC ロス・誘電損失・ジョイント部ジュール損を新たに考慮した解析プログラムを用いて、実規模級 3km 超電導ケーブルに 66kV 系統において想定される最大短絡電流 31.5kA-2.0s が流れた場合の温度・圧力解析を行ったので報告する。

2. モデルケーブルの解析条件

本研究では、3km の三心一括型の高温超電導ケーブルを対象とし、数値計算により超電導ケーブル内各部の温度分布及び、冷媒液体窒素の温度・圧力解析を行った。

ケーブルコア内部の金属層の温度分布は次の非線形熱伝導方程式を基礎式として算出した。

$$\rho_{cu} C_{cu} \frac{\partial T}{\partial t} = k_{cu} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + Q_{in} - Q_{out} \quad (1)$$

Q_{in} : 流入熱量 Q_{out} : 流出熱量

解析の際計算の簡便化のため (i)~(v) を仮定した。

- (i) 銅フォーマ/HTS 導体、及び HTS シールド/銅シールドをそれぞれ銅層一層の導体層、シールド層とみなし、各層内温度は径方向で一様とする。
- (ii) ケーブルコア内部の液体窒素は存在しないものとする。
- (iii) 絶縁層 (PPLP 層) の長手方向の熱伝導は無視する。
- (iv) 境界条件として入口の冷媒の温度と圧力を与える。
- (v) 冷媒の質量流量は一定とする。

以上の仮定を考慮した場合におけるケーブルの長手方向断面の模式図及び熱の出入りを Fig. 1 に示す。

ケーブルコア壁面の温度 T_{wall} は、境界条件から絶縁層の冷媒壁面における半径方向熱流束が、壁面における冷媒の強制熱伝達による熱流束と等しいとして算出した。

$$\frac{2\pi k_{pplp} (T_{sh} - T_{wall})}{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)} = 2\pi r_3 h_t (T_{wall} - T_{LN_2}) \quad (2)$$

T_{sh} : シールド層温度 T_{LN_2} : 冷媒温度 h_t : 熱伝達係数

冷媒の特性は GASPAC を用いて計算した。モデルケーブルの各パラメータを Table 1 に示す。AC ロスと誘電損失は各要素へ熱量として加算した。ジョイント部ジュール損は Fig. 2 に示すように 500m 間隔で加算した。

3. 解析結果

Fig. 3 は 31.5kA-2.0s の短絡電流通過時における出口部の冷媒の温度・圧力解析の結果である。短絡事故発生後約 60s で出口部の冷媒の温度が飽和温度に到達し、これ以降は冷媒が気化するというを示す。次に遮断時間を 2.0s から 0.1s 刻みで短縮させて解析を行ったところ、Fig. 4 に示す様に 0.6s 以下であれば出口部の冷媒温度が飽和温度に達しないことがわかった。

4. 今後の予定

今後は、飽和温度到達後の冷媒の挙動を予測するために気液二相流を考慮した解析を行う予定である。

Table. 1 Specifications of the Model Cable

Symbol	Quantity	Value
r_0	Outer radius of Conductor Layer	12.38 mm
r_1	Outer radius of Dielectric Layer	19.95 mm
r_2	Outer radius of Shield Layer	22.09 mm
r_3	Outer radius of Insulation Layer	23.21 mm
r_4	Average inner radius of Corrugated pipe	53.50 mm
S_{co}	Cross-sectional area of Former Layer	282.82 mm ²
S_{sh}	Cross-sectional area of Shield Layer	192.69 mm ²
$T_{LN_2} _t^0$	Inlet Temperature of LN ₂	70.0 K
$P _t^0$	Inlet Pressure of LN ₂	500 kPa
$V _t^0$	Inlet Flow rate of LN ₂	60 L/min

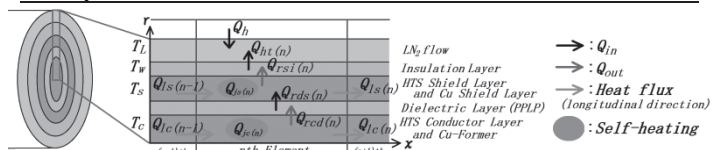


Fig. 1 Model Cable Structure and Heat flow



Fig. 2 Schematic View of Joule Loss at Joint

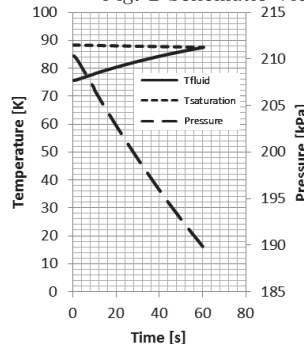


Fig. 3 Calculation Result of Temperature and Pressure at outlet (31.5kA-2.0s)

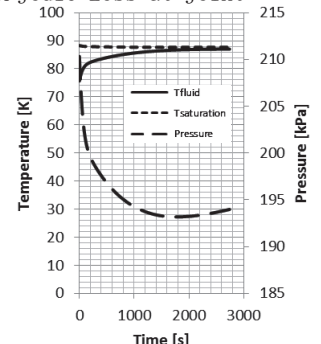


Fig. 4 Calculation Result of Temperature and Pressure at outlet (31.5kA-0.6s)

謝辞

本研究は、「次世代送電システムの安全性・信頼性に係る実証研究」の一環としてNEDOの助成により実施した。

参考文献

1. M.Furuse, S.Fuchino, K.Agatsuma, et al.: IEEE Trans. On Applied Superconductivity, Vol. 21 (2011) p.1021
2. T.Yasui, Y.Sato, K.Agatsuma, et al.: Abstracts of CSSJ Confedence, Vol.91(2015)p.156

JT-60SA CS・EF コイル用導体及び接続部の試験結果に関する総括

Review of conductor and joint test results of JT-60SA CS and EF coils

尾花 哲浩, 高畑 一也, 濱口 真司, 力石 浩孝, 野口 博基, 小淵 隆, 森内 貞智, 今川 信作, 三戸 利行(NIFS);

木津 要, 村上 陽之, 土屋 勝彦, 夏目 恭平, 吉田 清(原子力機構);野元 一宏, 金 太炫(三菱電機)

OBANA Tetsuhiro, TAKAHATA Kazuya, HAMAGUCHI Shinji, CHIKARAISHI Hiroataka, NOGUCHI Hiroki, KOBUCHI Takashi,

MORIUCHI Sadatomo, IMAGAWA Shinsaku, MITO Toshiyuki (NIFS); KIZU Kaname, MURAKAMI Haruyuki, TSUCHIYA

Katsuhiko, NATSUME Kyohei, YOSHIDA Kiyoshi (JAEA); NOMOTO Kazuhiro, KIM Tae-hyun (Mitsubishi Electric Corp.)

E-mail: obana.tetsuhiro@LHD.nifs.ac.jp

1. はじめに

2007 年度から 2014 年度に亘り, 日本原子力研究開発機構(JAEA)と核融合科学研究所(NIFS)が共同で, JT-60SA 中心ソレノイド(CS)・平衡磁場(EF)コイル用導体及び接続部の性能評価試験を行った。本試験では, 4 種類の導体サンプル, 及び 7 種類の接続サンプルを, NIFS の試験装置を用いて評価した。本講演では, 性能評価試験の総括について報告する。

2. 試験装置

本試験では, NIFS が所有する大型導体試験装置, 及び中型導体試験装置を用いた。大型導体試験装置では, 最大電流 75kA・最大磁場 9T 環境下で, 浸漬冷却と強制冷却の2つの冷却方式に対応した試験が可能である。中型導体試験装置は, 最大電流 20kA・最大磁場 8T 環境下で, 浸漬冷却に対応した試験が可能である。

3. 導体性能評価試験

大型導体試験装置を用いて, CS・EF 導体サンプルの分流開始温度(Tcs)測定と安定性試験を行った。Table 1 に各導体の仕様と Tcs 測定結果の一部を示す。本測定では, Tcs を $10 \mu V/m$ と定義した。CS 導体と EF 導体は, それぞれ, 超伝導素線に Nb₃Sn と NbTi を使用したケーブル・イン・コンジット(CIC)導体である。導体サンプルの形状は, 試験で要求される磁場強度を考慮して, CS 導体はヘアピン形状, EF 導体はラケット形状とした。各導体サンプルの全長は, 1.5 m 程である。Tcs 測定を行った結果, CS・EF 導体の設計要求値を満足することができた。

CS 導体では Nb₃Sn 素線を使用する。そのため, 冷却昇温時の熱応力, 及び通電時の電磁力によって, 素線に歪が生じ, 導体性能の劣化が懸念された。そこで, CS 導体試験では, 4000 回の繰り返し通電と 1 回の昇温・再冷却を行った。その結果, 導体性能が劣化しないことを確認できた。

Table 1 Overview of the conductor tests.

	Prototype	EF-H	EF-L	CS
Strand	NbTi	←	←	Nb ₃ Sn
No. of strand	486	450	216	←
No. of Cu wire	0	0	108	←
Cabling pattern	3/3/3/3/6	3/5/5/6	3/3/6/6	←
Sub-wrapping	w/	w/o	←	←
Void fraction	30-32%	34%	←	←
Jacket outer size [mm×mm]	28.0 × 28.0	27.7 × 27.7	25.0 × 25.0	27.9 × 27.9
Sample configuration	Racket -shaped	←	←	Hairpin-shaped
Test conditions				
Current	20 kA	←	←	22.6 kA
Magnetic field	6.2 T	←	4.8 T	8.0 T
Tcs				
Requirement		5.82 K	6.14 K	7.51 K
Test result	6.2 K	6.21 K	7.24 K	8.75 K (before **the cycle) 8.85 K (after the cycle)

*Tcs is an abbreviation for current sharing temperature.

**The cycle means repeated electromagnetic and thermal cycles.

4. 接続部評価試験

CS・EF 導体接続部の接続抵抗測定を行った。Table 2 に各接続部の詳細と測定結果の一部を示す。CS pancake 接続には Nb₃Sn 撚線同士を突合せる Butt joint 方式を採用し, その他の接続部では, 撚線同士を銅ブロックを介して接続する Lap joint 方式を採用した。測定を行う際, 全長 1.5m 程のヘアピン形状とラケット形状の接続サンプルの測定は, 大型導体試験装置を使用し, 全長 0.5m 程のU字形の接続サンプルの測定は中型導体試験装置を使用した。また, 接続サンプルを冷却する際, ヘアピン形状の接続サンプル(CS pancake 接続)は超臨界圧ヘリウムにより強制冷却を行い, その他の接続サンプルは液体ヘリウムで浸漬冷却した。接続抵抗測定の結果, CS Terminal (Type B)を除き, すべての接続部で設計要求値(5 nΩ)を満足することができた。

Table 2 Overview of the conductor joint tests.

	EF Prototype	EF Pancake	EF Terminal	EF Feeder	CS pancake	CS Terminal (Type A)	CS Terminal (Type B)
Joint Type	Lap joint	←	←	←	Butt joint	Lap joint	←
Jointed cables	NbTi	←	←	←	Nb ₃ Sn	NbTi/Nb ₃ Sn	←
Sample configuration	U-shaped	Racket-shaped	←	U-shaped	Hairpin-shaped	Racket-shaped	←
Test conditions							
Current	20 kA	←	←	←	←	←	←
Temperature	4.2 K	←	←	←	7.0 K	4.2 K	←
Magnetic field	2 T	3 T	←	2 T	←	4 T	←
Cooling	Bath	←	←	←	Forced flow	Bath	←
Joint resistance							
Requirement	-	5.0 nΩ	←	←	←	←	←
Test result	1.9 nΩ	1.9 nΩ	2.1 nΩ	1.7 nΩ	2.1 nΩ	1.2 nΩ	16.8 nΩ

JT-60SA 中心ソレノイドモジュールの温度解析

Temperature Estimation of JT-60SA Central Solenoid Module

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

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

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]。試験の結果、サーマルシールドからの放射や計測線からの入熱により、最上部の第一層が温められ、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、最外ターンから供給された冷媒が最内ターンに達した時の温度は、供給温度より 1.1 K 程度高くなる事が判明した[2]。

これは、JT-60SAのCSのように最外ターンから冷媒を供給する設計の場合、磁場が高く、分流開始温度(Tcs)が低くなる最内ターンを十分冷却できなくなる可能性を示している。すなわち実機モジュールについても、外部からの入熱により最内ターンの温度が上昇し、モジュール全体の安定性を低下させる可能性が考えられる。

そこで、層間の熱伝導を模擬した解析を実施し、モジュール内の温度分布評価を行うとともに、温度マージンへの影響について評価した。本発表では、温度解析の概要・結果および温度マージンへの影響について報告する。

2. 温度解析モデル

モジュール内の温度解析は流体解析コード Flower[3]を用いて実施した。CS全体は、52層のモジュールが4つ重ねられた、総数 208 層で構成されるが、解析では計算負荷の低減のため 30 層分をモデル化した。放射や計測線を通した熱負荷が第一層に加わり、第二層以降は層間の熱伝導により熱が伝わることを模擬した(図1)。

最上層へ加わる熱負荷は CS モデルコイルの試験と同じ 0.50 W/mを採用した。CSモデルコイルには計測線が多く取り付けられており、実機モジュールより入熱が大きいと考えられるが悪いケースを想定して計算した。層間の熱伝達係数もCSモデルコイルの温度解析で用いた 0.17 W/Kmを使用した。

冷媒入口圧力は 0.5MPa とし、ヘリウム流量が定格の 6g/s で圧損が 50kPa となるように導体の水力直径を決定した。冷媒入口温度は 4.4K とし、流量を 1~6g/s と変化させ解析を実施した。流量は出口圧力を変化させ調整した。

3. 解析結果

図2に流量1~6g/sの場合における第20層までの最内ターンの温度分布を示す。解析結果より、最内ターンの温度が上昇する層数は第3,4層までであり、それより深い位置の層には外部からの熱負荷の影響はなく、最内ターンの温度は一定であることが分かった。第1,2層の温度上昇は流量が小さくなるほど多くなり、1g/sの場合で約0.7Kであった。

これらの温度上昇がモジュール全体の安定性に与える影響を調べるため、Tcs および温度マージンを評価した。流量 6g/s と流量 1g/s における各層の最内ターンの温度、Tcs および温度マージンの分布を図3,4に示す。

図3より最小の温度マージンが現れる部分は、磁場の高い中心部であり、約3.8Kである。一方、図4より温度上昇の見られる3,4層目までの温度マージンに着目すると、流量 6g/s では温度マージンの低下はなく、流量が 1g/s に減少した場合でも最小の温度マージンは 4.5K 程度であり、磁場の高い中心付近の約 3.8K より大きいことが分かった。

以上の結果より、外部からの入熱による最内ターンの温度上昇の影響は、磁場分布による Tcs の低下に比べると影響は小さく、モジュール全体の温度マージンへの影響はない事が確認できた。すなわちJT-60SAのCSは、最外ターンから冷媒を供給する方法で十分冷却できることが示された。

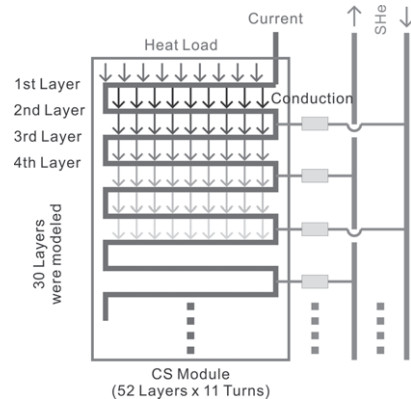


Fig.1 Temperature Analysis Model for CS Module

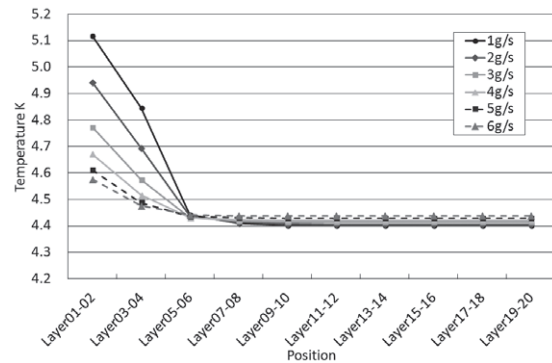


Fig.2 Temperature of Inner Most Turn

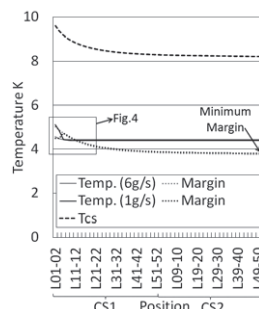


Fig.3 Tcs Margin of Inner Most Turn

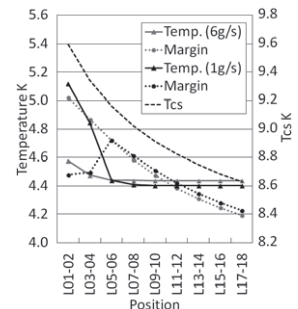


Fig.4 Details of Tcs Margin of Inner Most Turn

参考文献

- H. Murakami, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 88 (2013) p.112
- H. Murakami, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 90 (2014) p.113
- FLOWER: Hydraulic Network Simulation. http://botturl.web.cern.ch/botturl/CryoSoft/manuals/Flower_4.4.pdf

ヘリカル型核融合炉への適用をめざした 100 kA 級高温超伝導 STARS 導体の通電特性

Current-carrying characteristic of 100 kA-class HTS STARS conductors for the LHD-type helical fusion reactor

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

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

E-mail: terazaki@nifs.ac.jp

1. 背景

核融合科学研究所で設計活動が進められているヘリカル型核融合炉 FFHR-d1 のヘリカルコイルには 100 kA 級の導体が必要とされている[1]。著者らはそれに適した高温超伝導 (HTS) 導体として、STARS (Stacked Tapes Assembled in Rigid Structure) 導体を提案している。この導体は HTS 線材を単純積層した構造を持ち、高い冷却安定性と機械特性が特徴である。著者らはこれまでに 30 kA 級導体[2]、100 kA 級導体[3]を試作 (全長約 3 m) して通電試験を行ってきた。これらの試験において、通電電流が導体の臨界電流値を超えたとき、導体の発熱が冷却を上回ってクエンチする場合と発熱と冷却が平衡しクエンチしない場合とがあった。本発表ではその条件について調査した。

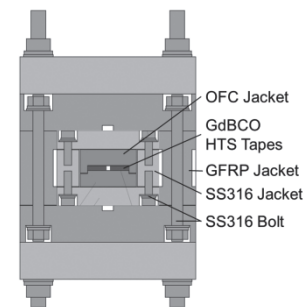


Fig. 1 Cross-sectional illustration of a 30 kA-class STARS conductor.

2. STARS 導体におけるクエンチ電流

Fig. 1 に著者らが製作した 30 kA 級導体サンプルの断面図を示す。この導体はフジクラ社製 GdBCO 線材 20 枚を銅ジャケット内に単純積層し、その周りをステンレスジャケット、FRP ジャケットで囲った構造をしている。温度計やヒータ、電圧タップはステンレスジャケットに取り付けている。この導体と Fig. 2 に示すようにレーストラック形状の短絡サンプルとした。レーストラックの直線部の片方には東北大学で開発された機械式ブリッジジョイントによる接続部が設けられた。この短絡サンプルには外部磁場を変化させることによる誘導電流にて通電を行った。

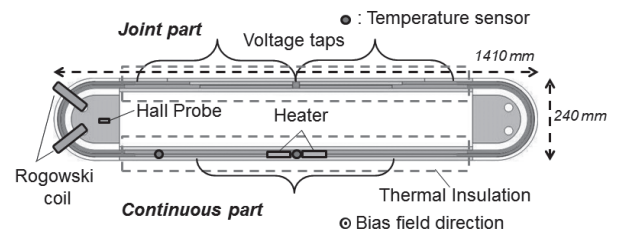


Fig. 2 General view of a 30 kA-class STARS conductor

Fig. 3 に 20 K での通電試験結果を示す。Fig. 3 の上は外部磁場とサンプルに流れた電流、下はサンプルの温度を示す。Fig. 3 上図において、磁場を 5.6 T から 3.7 T まで変化させたとき、サンプル電流は 4.3 T 付近で約 50 kA のピークを迎え、その後クエンチを起こさずいったん下がり、外部磁場が変化する間電流が流れ続けた。外部磁場が一定となり電流が減衰した後、再度磁場を変化 (3.7 T → 2.5 T) させると、2.8 T 付近にて 50 kA を少し超えたところでクエンチした。このときの臨界電流値はそれぞれ 48.5 kA@4.2 T、50.6 kA@2.8 T であった。Fig. 3 下図から、クエンチしなかった場合のサンプル温度は 1-2 K、クエンチした場合は 3.5-6 K 温度上昇していることがわかった。当日の発表ではこれらの実験結果に対して行った数値解析結果について詳細に示す。

参考文献

- [1] A. Sagara et al., Fus. Eng. Des., **89** (2014) 2114
- [2] Y. Terazaki et al., IEEE Trans. Appl. SC., **24** (2013) 4801305
- [3] Y. Terazaki et al., IEEE Trans. Appl. SC., **25** (2014) 4602905

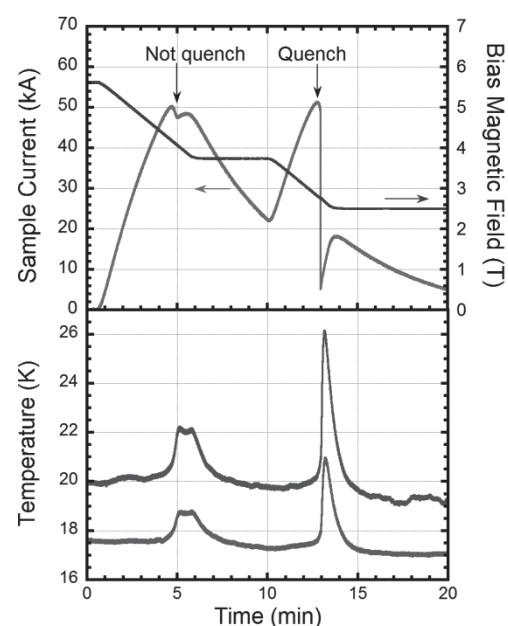


Fig. 3 Waveforms of the sample current and the bias magnetic field (top) and the sample temperature (bottom).

ヘリカル型核融合炉のマルチスケール構造解析と 3D プリントを用いた組立検討 Multi-scale Stress Analysis and 3D Printer Aided Structure Investigation for the Helical Fusion Reactor

田村 仁, 柳 長門, 高畑 一也, 相良 明男 (核融合研); 伊藤 悟, 橋爪秀利 (東北大)
TAMURA Hitoshi, YANAGI Nagato, TAKAHATA Kazuya, SAGARA Akio (NIFS);
ITO Satoshi, HASHIZUME Hidetoshi (Tohoku univ.)
E-mail: tamura@nifs.ac.jp

1. はじめに

NIFS ではヘリカル型核融合炉 FFHR-d1 の概念設計を進めている。ガス冷却方式 HTS や Nb₃Sn による CICC、間接冷却等いくつかの超伝導候補が提案されており、これらの機械的物性値と構造物全体、および導体内部に作用する応力・ひずみ分布を評価する必要がある。マルチスケール解析では数ミリ単位の導体内部構造から数十メートル規模の全体構造を一貫して解析することができるため、この手法を用いてそれぞれの導体構造案に対応した機械的挙動を解析した。

また、ヘリカルコイルの巻線に関して、HTS 導体を接続しながら組み立てる方法が提案されており、ヘリカル形状での分割巻線が可能な長さが必要なギャップについて、3次元プリンタによる造型で組み立てを模擬することにより検証した。

2. マルチスケール解析

主半径 15.6m、小半径 3.744m のヘリカル型核融合炉 FFHR-1 の超伝導マグネットでは、Fig.1 に示すような3種類の超伝導導体が候補となっている。はじめにこれらの物性値を均質化解析によって求めた。均質化解析は周期的に繰り返す構造をもつ対象の基本ユニットを詳細にモデル化し、全ての方向からひずみを与えて得られる反力から算出される。構造全体の解析では、基本ユニットは得られた物性値を持つ一つの有限要素に置き換えられる。全体解析の結果から注目したい部分のひずみ成分を抽出し、それを均質化解析で用いた詳細モデルに与えることで導体内部の詳細な応力分布を得ることができる。例えば、全体解析で面内せん断応力が高いコイル断面に注目し、その部分の導体内部の絶縁物の状態を解析すると、Fig.2 に示すような垂直応力、層間せん断応力が得られる。これらの応力を相関分布で表すと Fig.3 のようになる。図中の一点鎖線は LHD のポロイダルコイル製作時に適用された健全性評価[1]、破線は ITER[2]でのものである。それぞれで評価している絶縁物の強度は異なるが、いずれも絶縁物の積層方向の垂直応力とせん断応力の関係から定義されている。ITER ではさらに垂直応力が圧縮側であることが規定されている。今回の評価ではいずれの導体形式でも LHD での評価基準内に入る結果であった。

3. 3D プリントによる接続ヘリカルコイル巻線検討

HTS 導体は温度マージンに余裕があるため、接続方式でのヘリカル巻線が検討されている。発熱量は接続箇所の総数に依存するので、ヘリカル巻線に対してどの程度の長さ毎に接続できるのかを知ることが重要である。そのため、3D プリントを用いてコイル容器溝と導体を模擬したモデルを作成して検討した。結果として、導体幅に対して 7.5%増以上の広い溝であれば、ヘリカル1ピッチ長に相当する導体で、形状成型後のはめ込みが可能であることがわかった (Fig.3)。

参考文献

1. K. Kitamura et al., IEEE Trans. Magnetics, vol. 30, no. 4 (1994).
2. ITER Structural Design Criteria for Magnet Components, N11 FDR 5001-07-05 R 0.1, Naka, Japan, (2001).

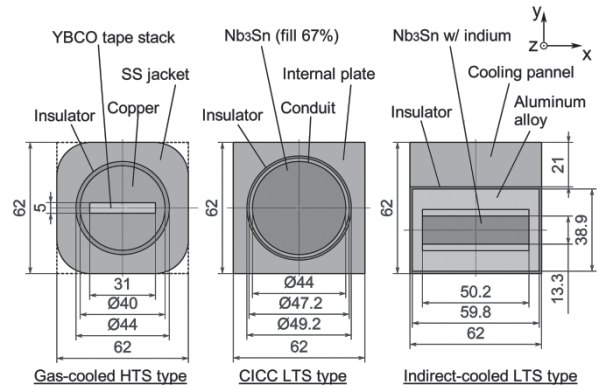


Fig.1 Cross-section of candidate designs of a superconductor.

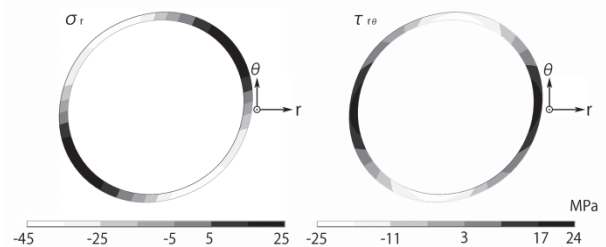


Fig.2 Normal stress (left) and in-plane shear stress (right) distribution of the insulator in the gas-cooled HTS type superconductor.

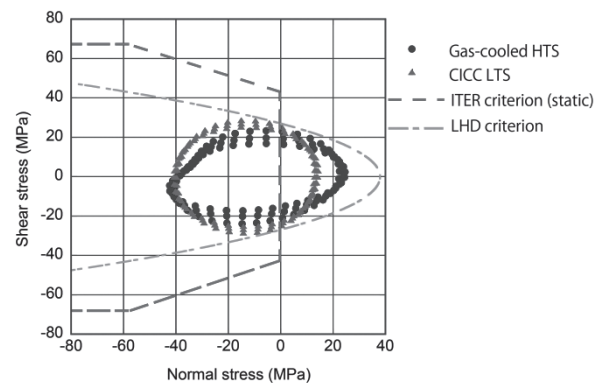


Fig.3 Correlation between the shear stress and the normal stress in the insulator of the gas-cooled HTS type and the CICC LTS-type superconductor.



Fig.4 Photo images of the 3D printer models used for the feasibility study of segmented fabrication of the helical coil.