

REBCO コイルにおける LTS マグネットクエンチの影響

Influences of Low-Temperature-Superconducting magnets quench on the REBCO coils

武藤 翔吾, 土屋 雄司, 小黒 英俊, 淡路 智, 渡辺 和雄(東北大学);
宮崎 寛史, 花井 哲, 井岡 茂(東芝);大保 雅哉, 飯島 康裕(フジクラ)

MUTO Shogo, TSUCHIYA Yuji, OGURO Hidetoshi, AWAJI Satoshi, WATANABE Kazuo (Tohoku Univ.);
MIYAZAKI Hiroshi, HANAI Satoshi, IOKA Shigeru (Toshiba); DAIBO Masanori, IJIMA Yasuhiro (Fujikura)
E-mail: s.muto@imr.tohoku.ac.jp

1. はじめに

REBa₂Cu₃O_y (REBCO; RE:希土類元素およびY)線材は、強磁場特性が優れていることから、次世代の強磁場超伝導マグネットへの応用が期待されている[1]。

REBCO 線材において問題となるのは、臨界電流 I_c を超える過電流が流れた際の保護である。REBCO 線材の常伝導伝播速度は ~ 1 cm/s と、低温超伝導(LTS)線材の常伝導伝播速度と比べると数桁低い[2]。そのため、過電流が流れた際、ホットスポットが発生し焼損または劣化することが懸念される。特に、LTSコイルとREBCOコイルを組み合わせた強磁場マグネットにおいて、外挿LTSマグネットがクエンチすると、電磁誘導により REBCO コイルに過電流が誘起される。よって、LTS マグネットのクエンチによって誘起される過電流から REBCO コイルを保護する方法の確立は、実用マグネットの信頼性を保証する上でも、非常に重要となる。

しかし、LTS マグネットのクエンチによって過電流が誘起した状況における REBCO コイルの熱電磁気応答はよくわかっていない。そこで我々は、LTS マグネットのクエンチ状況を模擬した実験環境を構築し、REBCO コイルに過電流が誘起した際の振る舞いについて調査してきた[3]。今回は、REBCO シングルパンケーキコイルを用いて、初期温度および、保護抵抗値をパラメータとして系統的に実験を行ったので、その結果について報告する。

2. 実験方法

実験に用いた試験コイルは、エポキシ含浸シングルパンケーキコイルである。諸元を Table 1 に示す。使用した線材はフジクラ社製 GdBCO 線材で、ハステロイ基板 100 μm 、銅安定化層 100 μm をはんだで貼り合わせた構造である。

実験装置は、試験コイルを組み込んだ伝導冷却式クライオスタートと、外挿する無冷媒 LTS マグネットによって構成される。試験コイルを 20–50 K の範囲において、ある一定の温度で保持した状態で、LTS マグネットをクエンチさせる。クエンチは、5 T 励磁中に電源を遮断し、保護回路を動作させることによって行った。また、試験コイルは可変抵抗器のみに接続されており、3.88–13.4 m Ω の間で保護抵抗値を変化させることで、誘起させる電流値を制御した。

3. 実験結果および考察

LTS マグネットのクエンチ時における REBCO コイルの電磁気応答を Fig. 1 に示す。Fig. 1(a) に、REBCO コイルに誘起された電流および中心磁場(内挿図)、Fig. 1(b) に発生した REBCO コイル全体の抵抗性電圧の時間変化について示す。それぞれ 20–40 K の各温度における代表的な結果を示している。低温ほど、電圧上昇は急峻になり、電圧ピーク値は大きく、ピークの到達時間は早まる。この電圧の振る舞いは、順に超伝導状態、分流状態、常伝導状態を経て推移したと考えられる。したがって、定性的な振る舞いとして、常伝導状態の出現および温度上昇が低温ほど急激に起こっていることが示唆される。過電流からの保護方法確立のためには、定量的な最大到達温度の推定が重要となる。そのためには、発熱領域を見積もることが必要となる。そこで、数ターンごとに測定した電圧の結果を用いて、発熱領域を見積もり、最大到達温度を推

定した。その結果については当日報告する。なお、続報では、そのほかの推定方法として数値解析によって最大到達温度を導出した結果について報告する。

Table 1 Specifications of the REBCO single pancake coil.

REBCO Coil	
Conductor length [m]	40
Conductor thickness [mm]	0.22
Coil height [mm]	4.1
Inner diameter [mm]	96
Outer diameter [mm]	156
Number of turns	101
Self inductance [mH]	1.73

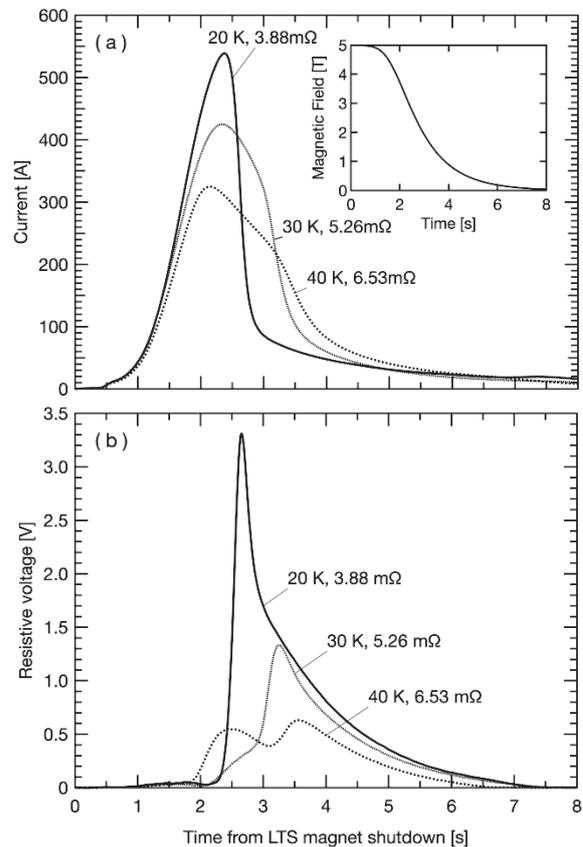


Fig. 1 Time evolution of (a) the induced current and (b) the resistive voltage in the REBCO single pancake coil.

謝辞

本研究の一部は科学研究費補助金 基盤(A)の補助を受けて実施しました。

参考文献

1. S. Awaji *et al.*, IEEE TAS, **24** (2014) 4302005.
2. Y. Yanagisawa *et al.*, SUST, **25** (2012) 075014.
3. S. Muto *et al.*, Abstract of CSJ Conference **87**(2013) 1A-a02.

外挿 LTS マグネットのクエンチに誘起された内挿 REBCO コイルにおける熱暴走

Thermal Runaway Behavior in an Insert REBCO Coil Induced by Quenches of an Outsert LTS Magnet

土屋 雄司, 武藤 翔吾, 小黑 英俊, 淡路 智, 渡辺 和雄 (東北大);
 宮崎 寛史, 花井 哲, 井岡 茂 (東芝); 大保 雅哉, 飯島 康裕 (フジクラ)
 TSUCHIYA Yuji, MUTO Shogo, OGURO Hidetoshi, AWAJI Satoshi, WATANABE Kazuo (Tohoku Univ.);
 MIYAZAKI Hiroshi, IOKA Shigeru (Toshiba); DAIBO Masanori, IIJIMA Yasuhiro (Fujikura)
 E-mail: y.tsuchiya@imr.tohoku.ac.jp

1. はじめに

前報において、外挿 LTS マグネットの電流遮断によって内挿 $REBa_2Cu_3O_{7-x}$ (REBCO, RE: 希土類) コイルに過電流が誘起された場合の電磁応答について議論した。

本報では、外挿 LTS マグネットクエンチ時の内挿 REBCO コイルにおける熱暴走の振る舞いを理解するため、温度を考慮した電磁気数値解析を行い実験結果と比較した。

2. 解析手法

数値計算に用いた外挿 LTS マグネットと内挿 REBCO コイルのモデルの諸元を Table 1 に示す。LTS マグネット遮断後の磁場の時間変化は前報に示した値を用い、以下の手順(1)から(4)を繰り返すことで REBCO コイル内の抵抗性電圧、誘導電流、温度分布の時間発展を計算した。

(1) LTS マグネットと REBCO コイルに流れる電流から REBCO コイル内の磁場分布を計算する。(2) フジクラ社製の REBCO テープ線材における典型的臨界電流密度特性から REBCO コイル内の臨界電流分布を計算する。(3) 残留抵抗比 100 の安定化銅層の抵抗率の温度依存性を考慮して分流モデルを用いて発熱分布を計算する。(4) 安定化銅層、ハステロイ層の比熱を考慮して、温度上昇分布を計算する。

ただし、手順(1)において、REBCO コイルによる遮蔽電流を無視し、軸対称磁場を仮定した有限要素法を用いて計算した。手順(2)において、臨界電流は温度に対して線形に減少し、60 K でゼロになると仮定した。手順(3)において、 n 値は 15.5 に固定した。手順(4)において、熱伝導を無視し、断熱条件を仮定した。また、開始時の温度を 40 K とした。

3. 解析結果及び考察

各保護抵抗値に対して得られた REBCO コイル内の抵抗性電圧の実験・数値解析結果を Fig. 1(a) に示す。計算結果は実験結果をよく再現した。各保護抵抗に対して REBCO コイル内の最大温度の時間変化を Fig. 1(b) に示す。保護抵抗 3.88、6.53 mΩ では常伝導領域が現れた。最大到達温度と常伝導転移したターン数の保護抵抗依存性を Fig. 2 に示す。保護抵抗が約 6.7 mΩ 以下のとき熱暴走が起こり急激に最大到達温度が上昇する。この振る舞いは、NMR マグネット用積層パンケーキコイルに関する数値計算結果についても報告されている[1]。この報告においては、保護抵抗を小さくするにつれ到達温度が単調に増加したのに対し、本報の最大到達温度にはピークが存在する点がある。これは、常伝導転移した小さな領域でエネルギーが消費されたためだと考えられる。また、保護抵抗 6.53 mΩ 時には内側から 8-16 ターンが 3 秒以降に常伝導領域となった。つまり、Fig. 1(a) の抵抗性電圧に見られた 2 つのピークは、誘導電流のピークと、熱暴走後の温度上昇を反映していると考えられる。以上の結果から、LTS マグネット遮断時に REBCO コイルは、保護抵抗値が小さいとき熱暴走状態となり、保護抵抗を大きくするにつれ分流状態を経て、臨界電流を超えない状態となることが分かった。当日は、最大到達温度の初期温度依存性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 基盤研究(A)25246032 の支援を受けて行われました。

参考文献

1. Y. Yanagisawa *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol. 24, (2014) pp. 4301005.

Table 1 Specifications of the LTS magnet and the REBCO coil.

	LTS magnet	REBCO coil
Inner diameter (mm)	317	96
Outer diameter (mm)	380	156
Height (mm)	377	4.1
Number of total turns	10856	101
Self inductance (mH)	24290	1.73
Mutual inductance (mH)		34.0
Coil constant (mT/A)	26.6	1.02

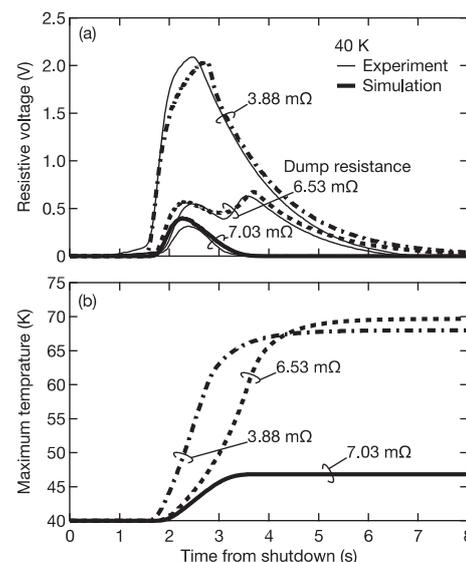


Fig. 1 Time dependence of (a) the resistive voltage and (b) the maximum temperature in the insert REBCO coil with each dump resistance after the shutdown of the outsert LTS magnet. Thin and thick lines show the experimental and the simulated results, respectively.

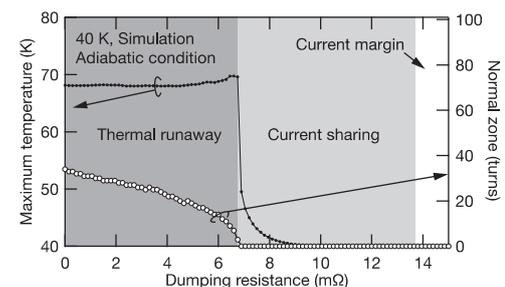


Fig. 2 Dump resistance dependence of the simulated maximum temperature and the number of turns in the normal state.

DI-BSCCO コイルのクエンチ保護(3) Quench protection of DI-BSCCO coil (3)

山口 貴寛, 上野 栄作, 加藤 武志, 林 和彦(住友電工)

YAMAGUCHI Takahiro, UENO Eisaku, KATO Takeshi, HAYASHI Kazuhiko (Sumitomo Electric Industries)
E-mail: yamaguchi-takahiro1@sei.co.jp

1. はじめに

高温超電導線は常電導伝搬速度が \sim cm/s と非常に遅いため、ホットスポットが発生し劣化することが懸念されている。その保護のためには、異常を検知した際、通電電流を速やかに下げることが必要と考えられる。しかしながら、20MW 級の大出力回転機ではコイルのインダクタンスが非常に大きく、電流減衰時定数を短くするには保護抵抗値を大きくし、コイル及びモータ内配線を高耐電圧化しなければならず、クエンチ検出・保護するための条件の最適化が必要である。そこで、大出力回転機(20MW 機)用コイルの1極を模擬した実機サイズのコイルで、電流減衰時定数とクエンチ検出電圧をパラメータとし、コイルを劣化させずにクエンチ検出・保護できる条件を調査したので報告する。また、実機サイズのコイルと発生磁界を同等とした小コイルで、熱伝達向上のため磁性体のフランジを用いた場合のクエンチ検出・保護できる条件を調査したので、その結果についても報告する。

2. 1 極模擬実機サイズのレーストラックコイル諸元

実験に使用した1極模擬実機サイズのコイルはDI-BSCCO 線材(Type Hi と Type HTi-SS)を用いて作製されており、Fig.1 に示すように幅 357 mm、全長 1657 mm のレーストラック型ダブルパンケーキコイルである。コイル 1 個に用いた線材は 3.2 km であり、エポキシ含浸している。これら 4 個を銅の冷却板と共に積層(Fig.1 右上)して実験を行った。

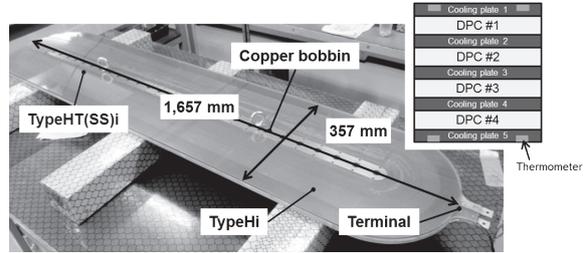


Fig.1 HTS racetrack coil

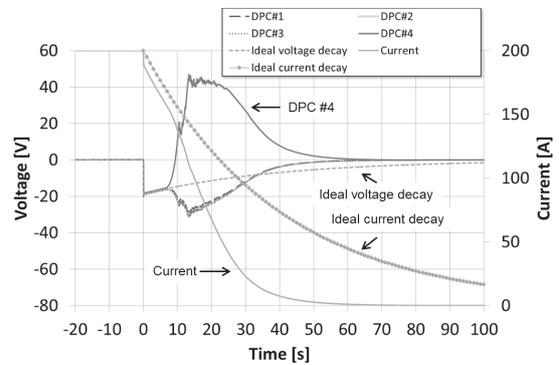


Fig.2 Voltage shift at detecting voltage 0.06 V and decay time constant 40 s

3. 実験方法

冷却は冷凍機伝導冷却で 30 K 前後の温度とし、極力温度差が無いような冷却パスとした。通電電流は 200 A、クエンチ検出はバランス回路を用い、クエンチ検出時間を 0.1s に固定した。クエンチはコイル温度を徐々に上昇させることで発生させた。クエンチ検出をすると保護抵抗により電流が減衰する方法とした。そのときの電流減衰時定数とクエンチ検出電圧を変化させることにより、コイルの劣化の有無を調査した。

4. 1 極模擬実機サイズのレーストラックコイル実験結果

Fig.2 と Fig.3 に実験データの一例として電流減衰時定数 40 sec、クエンチ検出電圧 0.06 V での電圧と温度(Cooling plate 5 のみ)を示す。また、横軸に電流減衰時定数、縦軸にクエンチ検出電圧としたグラフに実験結果を前回提示した小コイルの実験結果と共に示す(Fig.4)。実機サイズコイルの実験では電流減衰時定数 40 sec、クエンチ検出電圧 0.06 V で劣化が生じた。その条件での電流遮断時の発熱は 42 W であった。詳細は講演当日に報告する。

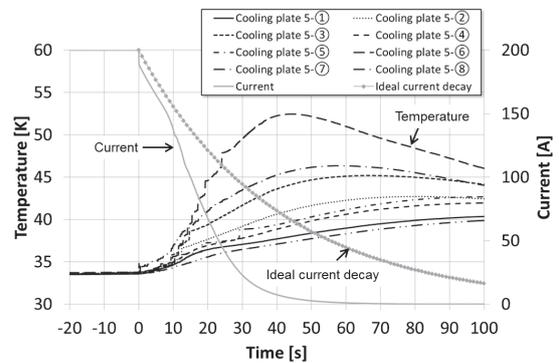


Fig.3 Temperature shift at detecting voltage 0.06 V and decay time constant 40 s (Only Cooling plate 5)

5. まとめ

今回の実験で用いたコイルでのクエンチ保護可能な電流減衰時定数とクエンチ検出電圧との関係を示した。また、今回の実験結果によると、クエンチ保護可能な電流減衰時定数とクエンチ検出電圧の関係は、コイルの大きさに依存しないように思われる。

6. 謝辞

本研究は研究成果展開事業「戦略的イノベーション創出推進プログラム(S-イノベ)」の支援を受けて進めたものである。

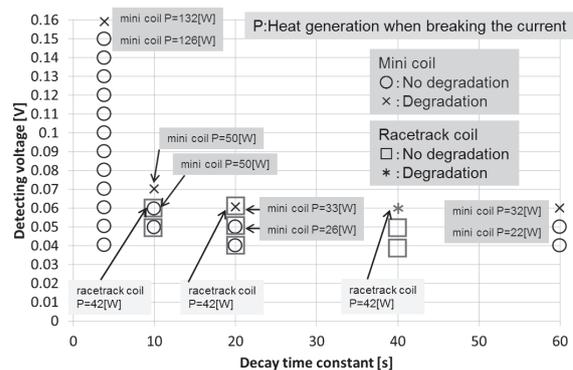


Fig.4 Decay time constant vs detecting voltage

ポインティングベクトル法による超伝導変圧器の運転モニタリングシステムの開発 7 -負荷変動中の局所異常検出-

Development of A Monitoring System of Superconducting Transformer by Using
the Poynting's Vector Method 7 -Detection of Normal Abnormality during Load Change-

久保 俊貴, 溝上 竜馬, 川越 明史(鹿児島大)

Toshiki Kubo, Ryoma Mizoue, Akifumi Kawagoe (Kagoshima University)

E-mail: k6562597@kadai.jp

1. はじめに

高温超伝導変圧器の実用化には、運転中に巻線の健全性を常時監視するシステムの開発が必要である。そのシステムは、高温超伝導巻線で生じる危険性の高い局所的な異常を、安全に検出できることが重要である。そこで我々は、ポインティングベクトル法を応用した新しい異常測定法[1]を用いる超伝導変圧器の非接触型運転モニタリングシステムを提案している[2]。本研究では、負荷変動中の局所的な異常を検出できるかを実験的に検討したので、その結果について報告する。

2. 本監視システムの測定法と負荷変動中の運転監視法

我々の提案している異常測定法では、電界測定用と磁界測定用の1対のピックアップコイルを用いる。局所的な電磁界を測定し、それらの外積からポインティングベクトルを求め、そのうちの有効電力成分(エネルギーフローと呼ぶ)を使って異常の判断を行う。

負荷変動中の局所的なエネルギーフローは、巻線の状態が正常でも変化する。そこで、超伝導変圧器の上部と下部の対称な位置のエネルギーフローを同時に測定し、その差を監視する。ピックアップコイル対の配置場所をFig.1に示す。正常時は、上下対称な位置のエネルギーフローはほぼ対称と考えられる。よってその差を求めれば、負荷変動に対応するエネルギーフローの変化がキャンセルされる。その結果、上下のどちらかのピックアップコイル対付近で異常が起きた場合、その異常を検出できる。

3. 実験

今回は、高さ約120 mm、一次側内径106 mm、二次側内径70 mm、定格容量800 VAの試験用超伝導変圧器を使用した。一次巻線と二次巻線には、77 K、自己磁界中での臨界電流が115 Aの高強度Bi-2223多芯テープ線材を使用した。

実験は次のような手順で行った。一次巻線に17.8 A_{rms}、50 Hzの交流電流を通電し、負荷を定格運転から定格の75%まで手動で変化させた。この状態を継続しながら、巻線部に室温の窒素ガスを噴射することで、局所的に巻線温度を上昇させることにより異常を発生させたエネルギーフローの測定と同時に、異常発生箇所に温度計を設置することで、巻線温度も測定した。

実験結果をFig. 2(a), (b)に示す。Fig. 2(a)は巻線部のエネルギーフローを、Fig. 2(b)は異常発生箇所の温度を示している。図中の灰色の領域は窒素ガスの噴射時間である。Fig. 2(a)より、各測定箇所のエネルギーフローが、負荷の変動に伴って変化していることがわかる。このため、エネルギーフローの変化が、巻線異常によるものか負荷変動によるものかの判断は困難である。しかし、各測定箇所のエネルギーフローの差分は、温度上昇がみられた30秒付近から大きな変化が観測されている。また、窒素ガスの噴射を止めた62秒付近以降、測定信号の差分からも徐々に正常な状態へ復帰していることが確認できる。以上より、本監視システムによって、負荷変動中において、巻線に生じた局所的な異常を検出できることがわかった。

4. まとめ

高温超伝導変圧器巻線に接続した負荷を変動させながら局所的な異常を巻線に発生させ、本運転監視装置により検出試験を行った。その結果、負荷変動中においても、高温超伝導変圧器に生じた局所的な異常を検出できることを示した。このことから、本監視システムが高温超伝導変圧器の巻線の監視に有効であることを実証した。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 25820106 の助成を受けたものである。

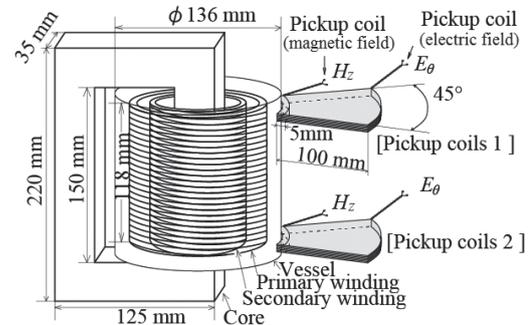
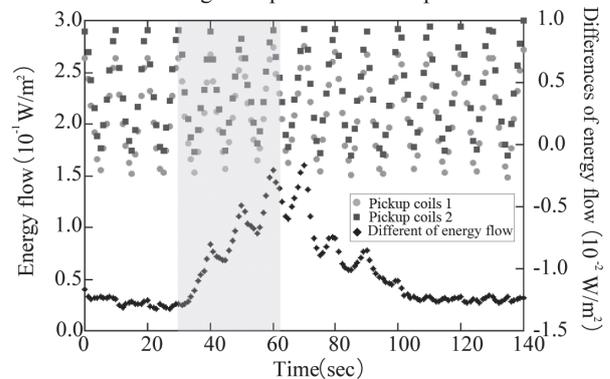
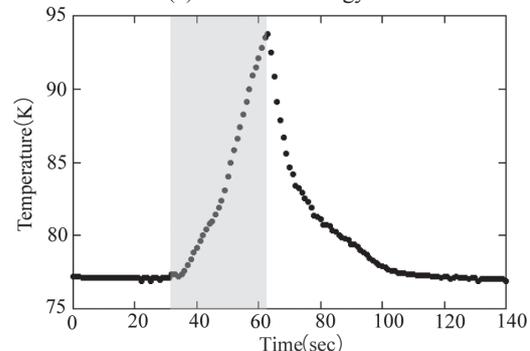


Fig. 1 Experimental setup



(a) Measured energy flow



(b) Temperature

Fig. 2 Experimental results

参考文献

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

Study on the radiation stability for COMET pion capture solenoid

Ye YANG (Kyushu University), Makoto YOSHIDA, Tatsushi NAKAMOTO, Toru OGITSU (KEK);

Nobuhiro SHIGYO, Kenji ISHIBASHI (Kyushu University)

E-mail: yangye@post.kek.jp

1. Introduction

Coherent muon electron to transition (COMET) experiment is aiming to discover the new physics through the rare decay processes, $\mu^- + N(A, Z) \rightarrow e^- + N(A, Z)$. The superconducting magnets system plays a significant role in whole experiment, since muon beam intensity and their momentum are affected by the magnetic field. However, the superconducting magnets have to work under the high radiation environment to obtain a goal of 10^{11} muons/sec with low momentum. The magnets will be refrigerated by conduction from the cooling pipes with 2-phase liquid helium flow. In this paper, the radiation stability of the most important superconducting magnet, pion capture solenoid, has been studied.

2. Radiation estimation

The Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS)[1] is used to estimate distributions of neutrons and charged particles in COMET experiment. It is predicted that the superconducting coils are irradiated by over 10^{21} n/m² neutrons and nuclear heating of 3.5×10^{-5} W/g will deposit in the conductor at peak during beam operation corresponding to the irradiation of 0.8 MGy for 280-day operation.

3. Thermal stability

The thermal stability is calculated by following the 3-dimensional heat equation. The heat deposition calculated by the PHITS code is employed as heat generation. Furthermore, considering the radiation damage in Al stabilizer, the resistivity should be fixed like $\rho(T) = \rho_0(T) + \Delta\rho_n + \Delta\rho_B$, where $\rho_0(T)$ is resistivity of conductor without magnetic field, $\Delta\rho_B$ is magnetoresistance and $\Delta\rho_n$ is neutron-induced resistivity. The relation between neutron flux and resistivity has been studied in the neutron irradiation with reactor neutrons[2], where the resistivity rises 0.03 nΩ·m for 10^{20} n/m² neutron irradiation. The RRR of stabilizer will drop to 160 for 1 month irradiation by using this factor.

The maximum temperature in the pion capture solenoid as a function of elapsed time of continuous beam operation is shown in figure 1. Obviously, the temperature will exceed the current sharing temperature of 6.5 K after 1 month operation, although the irradiation damage in aluminum can be recovered perfectly by thermal cycling to the room temperature. The peak temperature can be reduced to 5.6 K by modifying the inner heat sink size, sink edge length to helium cooling pipe.

The coil temperature at the possible magnet quench is estimated by using MIITs, and it is found out the the temperature will rise up to 266 K if the RRR drops to 100 in figure 2. To investigate the quench properties in detail, the

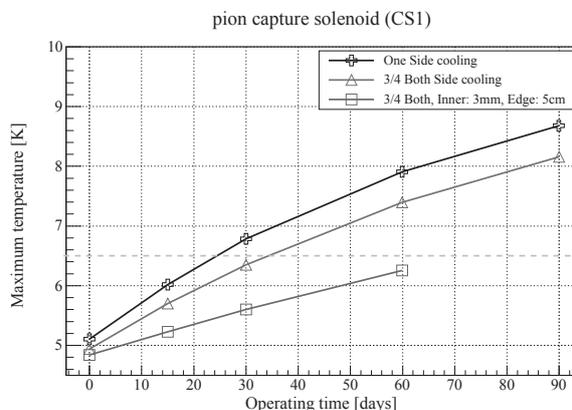


Figure 1: Maximum temperature in coils.

quench simulation with heat conduction with the complex structure of pion capture solenoid was carried out. Details of the analyses and the temperature distributions in the coil will be reported.

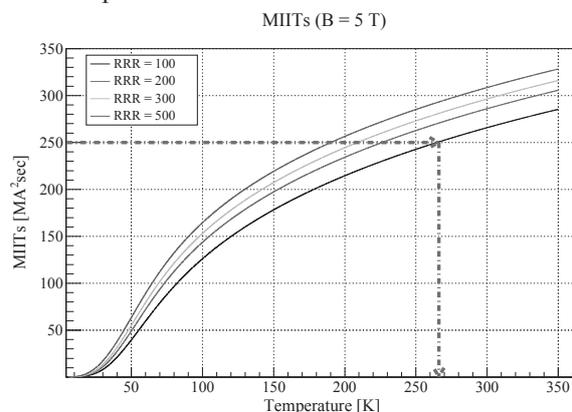


Figure 2: The MIITs estimation of conductor.

4. Conclusion

In this study, the radiation and maximum temperature of pion capture solenoid has been investigated. The thermal conduction can be degraded by neutron irradiation, and thermal cycling to the room temperature is likely to be needed after 1 month operation if the heat transfer along aluminum sink in the coil is not sufficient. Considering the temperature distributions in coils, the quench protection system should be designed carefully.

References

- [1] T. Sato, et al.: J. Nucl. Sci. Technol. 50:9 (2013), 913-923.
- [2] M. Yoshida, et al.: AIP-ICMC. 58:1435 (2012), 167-173.

浮上式鉄道用 RE 系高温超電導磁石の開発 -開発状況- Development of REBCO HTS Magnet for Maglev -Development Status-

小方 正文, 水野 克俊, 長谷川 均(鉄道総研)
OGATA Masafumi, MIZUNO Katsutoshi, HASEGAWA Hitoshi (RTRI)
E-mail: ogata.masafumi.54@rtri.or.jp

1. はじめに

鉄道総研は、希土系高温超電導線材(以下 REBCO 線材)の優れた磁場中通電特性に着目し、浮上式鉄道用超電導磁石への適用を目指している。これまでに要素機能確認用の小型 REBCO マグネットの製作、コイル含浸材料の特性評価、実機大レーストラックコイル試作等を行い、50 K 領域で運用するための課題の抽出ならびに対策を進めてきた。本講演では、これまでの開発実績を簡単にまとめた後、新たに実施した実機大コイルの冷却特性試験結果について報告する。

2. 要素確認用小型 REBCO マグネット

実機の 1/4 寸法のレーストラック形コイルを内蔵したモバイルマグネット(図 1a)では、コイル温度が 50 K の領域になると、真空槽内に発生するアウトガス対策が熱侵入増防止のために重要となることを確認した¹⁾。このアウトガス対策に関しては続く連報にて詳述する。また円形ダブルパンケーキコイルを 10 個積層した 5T マグネット(図 1b)では、コイル温度 45 K において実機並みの 5.2 T が発生可能なことを確認している²⁾。

3. 実機大試作レーストラックコイル

表 1 に実機大レーストラックコイル(1 極分)の設計例を示す。6 mm 幅線材 350 ターンのシングルパンケーキコイルを 8 枚積層し、機械的強度を担うコイルケースへ収納する。これまでに PTFE テープ共巻きおよびエポキシ樹脂含浸の手法により試作した実機大 72 ターンコイルについて、液体窒素浸漬冷却条件下で通電性能劣化の無いことを確認している³⁾。

4. 実機大レーストラックコイルの冷却特性試験結果

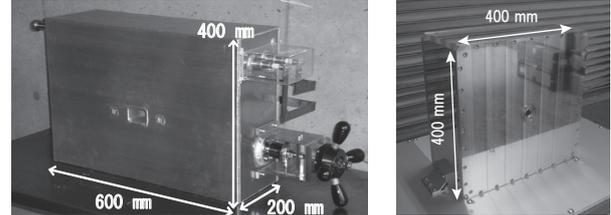
実機大レーストラックコイルには、①質量 140 kg 以下、②40 K 冷却時の温度分布 1 K 以下、③冷凍機停止後の 50 K 以下保冷時間 1 時間以上、といった実際の運用を考慮した目標値を設定した。図 2 に実機大レーストラックコイルの冷却特性試験用クライオスタット内部を示す。伝導冷却用単段パルス管冷凍機⁴⁾、コイル通電用のパワーリードを備えており、ジュラルミン(A2017)製のコイルケース内には、今回は高温超電導コイルと同等の熱物性を有する模擬コイルを収納した。また模擬コイルとコイルケースの間の空間は、熱伝導向上および保冷時間確保のために高純度アルミニウムや無酸素銅からなる熱容量材料を充填するためのスペースとしている(図 3)。

アルミと銅の体積比を 9:1 とした熱容量材料とダミーコイルをコイルケースへ収納して質量 120kg 弱の実機大レーストラックコイルを構成した。初期冷却温度 40 K 時の模擬コイル内温度分布は 1 K 以下であった。その後、模擬コイル温度 40 K、電流リードには 250 A を通電した状態で、冷凍機の異常停止を想定した冷凍機停止を行い、温度上昇特性を確認した(図 4)。模擬コイル温度が 40 K から 50 K に達するまでの時間は 55 分で、予測値 40 分よりも長くなった。これは模擬コイル・熱容量部材とコイルケース間に存在する熱抵抗が断熱効果となり、コイルケースの温度上昇影響が模擬コイル側へ緩やかに伝わったためと考えられる。今後は、模擬コイルを実機大 REBCO コイルに置き換えた試験を実施する計画である。

本研究は国土交通省の国庫補助金を受けて行った。

参考文献

1. M. Ogata, et al.: Abs. of CSJ Conference, Vol. 82 (2010) p.196
2. K. Mizuno, et al.: Abs. of CSJ Conference, Vol. 86 (2012) p.29
3. K. Mizuno, et al.: Abs. of CSJ Conference, Vol. 89 (2014) p.145
4. Y. Miyazaki, et al.: Abs. of CSJ Conference, Vol. 87 (2013) p.109



a. Mobile magnet b. 5T magnet
Fig.1 Small scale REBCO magnet

Table 1 Example of actual size race-track coil design

Wire type	REBCO(MOCVD) / Hastelloy
Width / Thickness	6 mm / 0.1 mm
Coil shape	Race-track (1070 mm × 500 mm)
Turns	2800
Operating current	250 A
Operating temperature	< 50 K
Inductance	12 H
Weight	< 140 kg (including coil case)

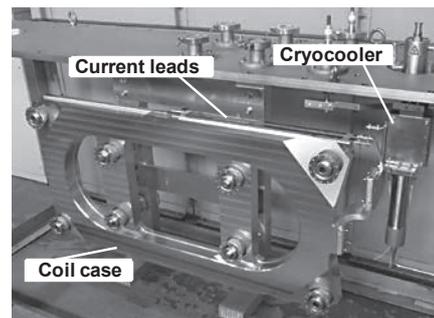


Fig.2 Inner view of cooling properties test for actual size coil

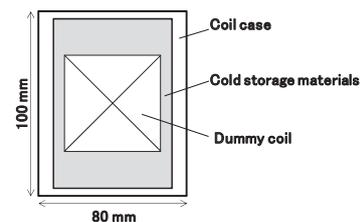


Fig.3 Cross section of coil case

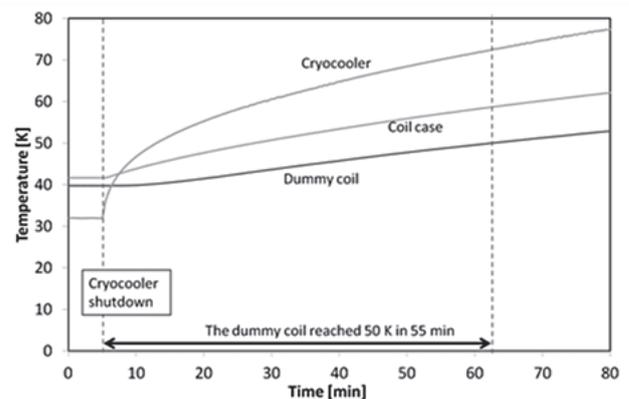


Fig.4 Test result of cold storage properties for actual size coil

浮上式鉄道用 RE 系高温超電導磁石の開発 -磁石構成部材のアウトガス評価-

Development of REBCO a HTS Magnet for the Maglev

-Measurement of outgas from magnet members-

水野 克俊, 小方 正文, 長谷川 均(鉄道総研); 藤平 誠一, 藤平 潤一, 藤平 秀幸, 内田 公 (フジヒラ)
 MIZUNO Katsutoshi, OGATA Masafumi, HASEGAWA Hitoshi (RTRI);
 FUJIHIRA Seichi, FUJIHIRA Junichi, FUJIHIRA Hideyuki, UCHIDA Akira (FUJIHIRA)
 E-mail: mizuno.katsutoshi.14@rtri.or.jp

1. はじめに

鉄道総研では、希土類系高温超電導線材の磁場中での優れた通電特性に着目し、浮上式鉄道への適用を検討している。運用温度の向上は冷凍機の消費電力低減や断熱構造の簡素化などの利点がある一方でアウトガスの問題がある。高温超電導磁石においては十分なクライオポンプ効果が得られず、長期的な運用においては真空槽にアウトガスが蓄積され、熱侵入の増加を引き起こしてしまう。超電導磁石内のアウトガス発生源の特定及び吸着剤の評価を行うため、アウトガス評価装置を製作したので報告する。

2. 超電導磁石構成部材用アウトガス評価装置

超電導磁石は真空槽に極低温を有する点で、常温の高真空槽とは異なっている。例えば、 H_2O は真空装置における主要なアウトガスの一つであるものの、150 K を下まわる低温域では飽和蒸気圧は十分に低くなる。そのため、超電導磁石においては、 H_2O はクライオポンプ効果により吸着される。しかしながら、 H_2 や N_2 は運用温度によっては真空槽に蓄積され熱侵入源となりうる。そのため、各種材料からのアウトガス放出速度の絶対値だけでなく、その成分も評価する必要がある。

今回製作したアウトガス評価装置はオリフィス法によるアウトガス放出速度測定と、四重極型質量分析計による成分分析を基本としている。特徴としては、超電導磁石を想定した環境でのアウトガス評価に特化している。サンプル設置チャンバに GM 冷凍機を有しており、サンプルを冷却しての評価や、サンプル自体は室温を維持しつつも冷凍機を起動してクライオポンプ効果の存在する環境でのアウトガス測定が可能である。また、外部からのガス導入配管も有しており、活性炭などの吸着剤の評価も可能な構成となっている。アウトガス評価装置の外観写真を図 1 に、主な仕様を表 1 に示す。

3. アウトガス測定

一般的に樹脂などの高分子材料は金属材料に比べてアウトガス放出量が多い傾向があるため、今回は高分子材料を中心に室温及び低温でのアウトガス評価を実施した。一例として、GFRP の室温と 50 K でのアウトガス評価試験結果を図 2、3 に示す。GFRP の形状は 120 mm × 120 mm × 5 mm であり、湿度 40 % の大気中で 2 週間保管したのちに、アウトガス評価装置の冷凍機コールドヘッドに固定して試験した。室温での測定に関しては真空排気開始から 25 時間後であり、その後冷凍機を起動しての評価に切り替えて、50 K での測定は 34 時間後となる。なお、比較のためサンプル未設置時のバックグラウンドの試験結果と併せて示している。室温においては H_2O 及び、 H_2 、 N_2 、 CO_2 などがアウトガスの成分であることが分かる。オリフィスでの圧力差から算出されるガス放出速度は $3.7 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ と高い値を示した。50 K においてはバックグラウンド、GFRP 設置時を比較しても各アウトガス成分の分圧はよく一致しており、ガス放出速度も十分に小さい結果となった。そのため、極低温条件ならば、GFRP は高温超電導磁石に用いてもアウトガス発生の要因にはならないと考えられる。多層断熱材やテフロン等の評価結果については当日報告する。

また、今後はアルミニウムなど真空槽を構成する金属材料についても評価を進め、高温超電導磁石の設計に必要な体系的なデータを取得していく予定である。

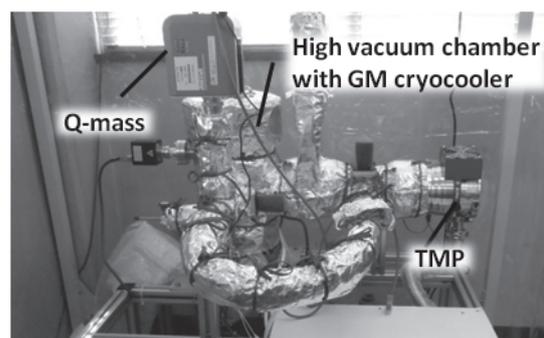


Fig.1 Picture of the outgas evaluation apparatus specialized for SCM

Table 1 Specifications of the outgas evaluation apparatus

Temperature range	20 K to 300 K
Lowest achieving pressure (w/o specimen)	1×10^{-6} Pa
Range of vacuum meter	1×10^{-7} Pa to 10^5 Pa
Measurable molecular weight	1 to 70

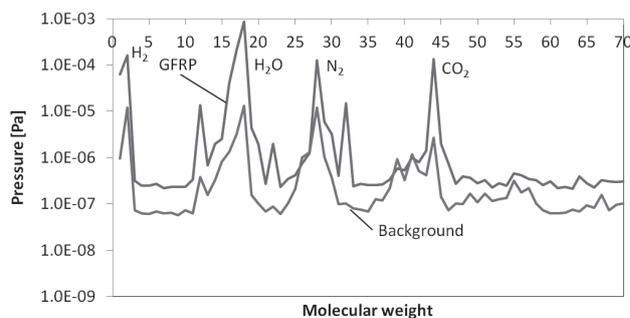


Fig.2 Partial pressure of outgas from GFRP at room temperature

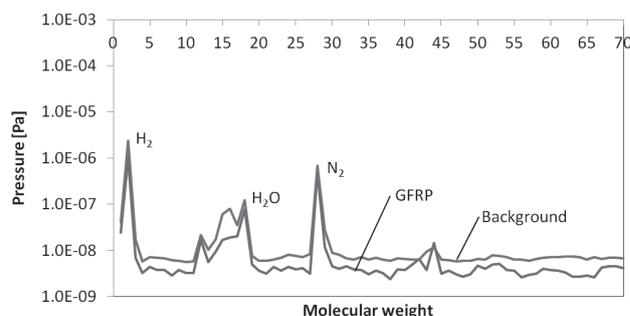


Fig.3 Partial pressure of outgas from GFRP at 50 K

本研究は国土交通省の国庫補助金を受けて行った。

Yoroi-coil 構造の小型パンケーキコイルにおける電磁力耐性 Electromagnetic force tolerance of the Yoroi-coil structured pancake coil

渡部 智則, 長屋 重夫, 平野 直樹 (中部電力); 淡路 智, 小黒 英俊, 土屋 雄司, 大村 拓也 (東北大学);
石山 敦士 (早稲田大学); 二森 茂樹, 清水 禎 (NIMS)

WATANABE Tomonori, NAGAYA Shigeo, HIRANO Naoki (Chubu Electric Power);
AWAJI Satoshi, OGURO Hidetoshi, TSUCHIYA Yuji, OMURA Takuya (Tohoku Univ.);
ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.); NIMORI Shigeki, SHIMIZU Tadashi (NIMS)
E-mail: Watanabe.Tomonori@chuden.co.jp

1. はじめに

超電導コイルの高磁場応用には、電磁力に対する耐性の高いコイル構造が必須である。我々は、これまでに Yoroi-coil と称する高強度パンケーキコイル構造を開発した[1]。Yoroi-coil は Y 系超電導線材の強度のみに依存するのではなく、コイルを構成する枠や側板が作用する電磁力(フープ力)の一部を分担して、コイル構造全体が電磁力を支えるパンケーキコイル構造である。今回、コイルの構造部材の一部に C-FRP (炭素繊維強化プラスチック)を使用した試験用コイルを用いて、Yoroi-coil 構造の電磁力耐性について評価を行ったので報告する。

2. 実験方法

電磁力試験に用いた Yoroi-coil 構造のダブルパンケーキ (DP) コイルは、絶縁被覆を施した (Gd,Y)BCO 超電導線材 (IBAD+CVD プロセス)を用いた。コイル巻線部分は、内径 219 mm、外径 240 mm、高さ 24 mm で、上下のコイルに 33 ターンずつ巻かれており、パラフィンでモールドしてある。Yoroi-coil 構造は、コイル巻線を、コイル巻線の円周外側に配置された枠材と上下の側板で覆う構造である。本実験では、枠材は G-FRP 製で、側板が C-FRP 製とした。使用した G-FRP のヤング率は 22 GPa (メーカ提供のデータ)、C-FRP は 42 GPa であった。図1にコイル外観を示す。液体ヘリウム浸漬によりこの DP コイルを 4.2K まで冷却し、NIMS の大口径マグネットにより 14 T の外部磁界を印加したのち、コイル通電することで、電磁力耐性を検証した。

3. 実験結果

図 2 に、外部磁界 14T において試験用 DP コイルに繰り返し通電した際の、電極を除くコイル全体の $I-V$ 特性を示す。誘導電圧は約 3 mV であった。1,100A までは電流の掃引を留めて電流値を保持すると、電圧はほぼ 0 mV になったが、それ以上の電流では抵抗による電圧の発生が認められ、コイルの臨界電流を超えたことが分かる。7 回目の通電で 1,136A を維持したところ、突如電圧上昇が起こり熱暴走によってコイルが焼損した。それまでの、電磁力試験結果からコイルの電磁力耐性を評価した。コイル周方向に作用するフープ応力は、線材が完全に独立として磁界(B)×電流密度(J)×半径(R)で計算し、かつ実質的に応力を負担するハステロイのみに応力



Fig. 1. Outlook of Yoroi-coil structured DP coil

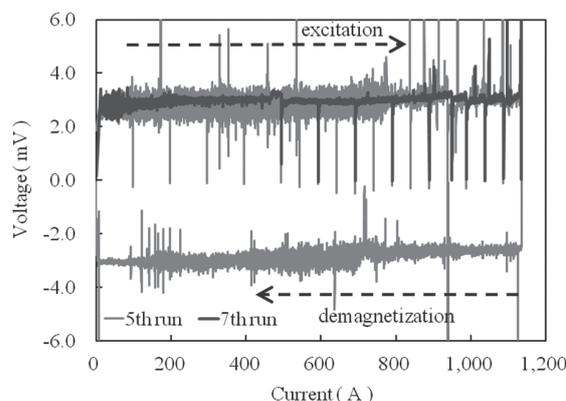


Fig. 2. $I-V$ characteristics of the Yoroi-coil structured DP coil with C-FRP reinforcing outer plates excited in 14 T magnetic field.

が負荷されたとすると最大で 2.0 GPa であった。なお磁界は、外部磁界に試験コイル自体の発生磁場(最大で約 1.8 T)を加えて算出した。これまでに、G-FRP の枠材と側板を用いたほぼ同形状の Yoroi-coil 構造の試験コイルで、1.7 GPa のフープ応力に耐えたと報告[1]したが、さらに強いフープ応力に対しても Yoroi-coil 構造が有効であることが確認された。一方で、高強度の C-FRP 側板を使用した効果は小さかった。図 3 に通電電流の変化による、試験コイル中の超電導線材のひずみの変化をひずみゲージで測定した結果を示す。ここに示したのは、DP コイルの上部コイルの最内層と最外層の超電導線材のひずみと G-FRP 外枠のひずみである。側板が G-FRP の場合と比較して、FRP 外枠の変形が小さいが、線材のひずみ量が低減されていない。つまり、側板の高強度化に比して支持する電磁力はあまり変化がない。よって、C-FRP 側板の適用には配置や側板の接続などに改善がさらに必要である。

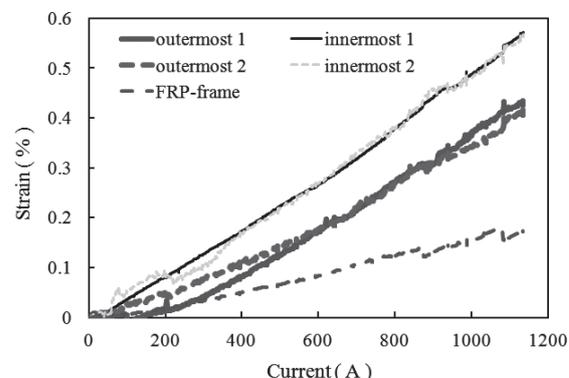


Fig. 3. Current dependence of the strains of superconducting wire and the frame in the lower coil of the Yoroi-coil structured DP coil with C-FRP reinforcing outer plates.

参考文献

1. T. Watanabe, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 86 (2012) p.25

ポインティングベクトル法を用いた超伝導コイルの交流損失測定

The Measurement of AC Losses in Superconducting Coils by Using Poynting's Vector Method

白木 拓弥, 樋口 英輝, 川越 明史(鹿児島大学); 岩熊 成卓(九州大学)

SHIRAKI Takumi, HIGUCHI Hideki, KAWAGOE Akihumi(Kagoshima University);

IWAKUMA Masataka(Kyuuusyuu University)

E-mail: k6065328@kadai.jp

1. はじめに

高磁場中で高温超伝導線材は、コイル巻線に使用することによって高磁界を高効率で発生できるため、現在さまざまな分野に応用されようとしている。最近、MRI や重粒子線加速器を高温超伝導化し、大幅な省電力化・高安定化、小型化を実現しようとする研究が行われている。

これらの機器を高温超伝導化するためには、線材内の磁化による磁場の乱れの低減や、交流損失の低減が大きな課題となっている。したがってこれらの課題を解決するためには、高温超伝導線材の交流損失といった電磁特性を定量的に把握する必要がある。このような目的の評価では、短尺直線形状の電磁特性の測定がよく行われているが、磁化の緩和などの特性評価のためには、一定の試料長が必要と考えられるとともに、コイル形状の影響も考慮する必要がある。また、試料コイル軸方向の成分で均一な磁界ではなく、径方向に広がるスプレッド磁界中の評価が重要である。

そこで本研究では、ポインティングベクトル法を応用することによって、スプレッド磁界中の磁化損失測定を行うことが可能な測定法について実験的な検討を行ったので報告する。

2. 測定原理

ポインティングベクトル法では、電界測定用ポテンシャルリードと磁界測定用ピックアップコイルを用いて局所的な電界と磁界を測定し、その外積からポインティングベクトルを求める。試料コイルの交流損失を測定するために、本測定法では、試料コイルの全周囲でポインティングベクトルを測定する(Fig. 1(a)参照)。すなわち、試料コイルの内側面、外側面、上下面のそれぞれの面で測定する。すべての測定結果を用いて面積積分を行うことにより交流損失を求めることができる。測定素子は、Fig. 1(b)に示すように測定素子は配置する。内側と外側に設置した測定素子対では、周方向電界と軸方向磁界を測定し、試料コイル径方向成分のポインティングベクトルを得る。上下に配置した測定素子対では、周方向電界と周方向磁界を測定し、試料コイル軸方向成分のポインティングベクトルを測定する。ポインティングベクトル法では、通常、電界を測定するために試料に電圧タップを半田付けするが、ここでは、外部磁界のみを印加するので、半田付けを行っていない。すなわちポテンシャルリードは1ターンのピックアップコイルである。

3. 実験

スプレッド磁場中の試料コイルの交流損失を、本測定法によって得ることができるかどうかを確認するために、測定装置の試作を行った。電界と磁界を測定する測定素子対は、試料コイル内側に 11 対、外側に 11 対ずつ配置し、試料コイル上下面には、それぞれ 5 対ずつ配置した。実験に用いた試料コイルは、軸長 84 mm、外径 65.8 mm の 2 層 18 ターン(全 36 ターン)のソレノイドコイルである。巻線に用いた線材は、幅 4.5 mm、厚み 0.4 mm の Bi-2223 多芯線テープ線材で、液体窒素中、磁化磁界中の臨界電流は 169 A である。測定素子対を配置した試料コイルを、ボア径 340 mm の外部磁界印加用銅マグネット内に配置した。スプレッド磁界を印加するために、測定装置はマグネット中心の均一磁場空間に配置せず、

マグネット中心から 200mm 上の場所に試料コイル中心を配置することにした。このとき、試料コイルに印加される外部磁界は、試料コイル軸方向に対して約 5 度に広がっている。

試料コイル液体窒素中で浸漬冷却し、100 Hz で測定した結果を Fig. 2 に示す。横軸は試料コイル中央の巻線に印加される磁界、縦軸は交流損失である。プロットは実験値、直線は理論値を表している。実験値と理論値はよく一致しており、本測定法の有効性が示されている。

なお、本研究の一部は JSPS 科研費 26249042 の助成を受けたものである。

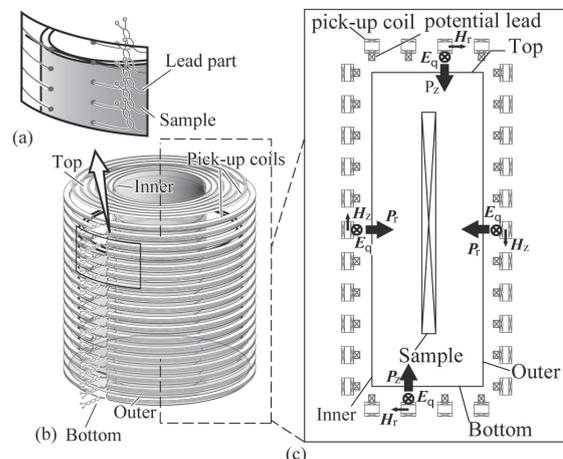


Fig. 1 Principle of the measuring method, (a) measuring area, (b) array of pick up coils and potential leads.

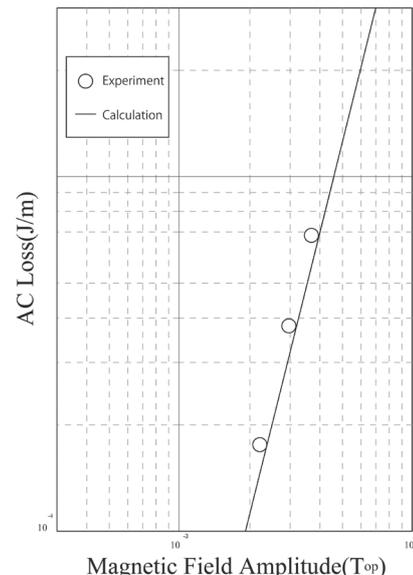


Fig. 2 Experimental results.

参考文献

1. H. Higuchi, et al. : Abstracts of CSJ Conference, Vol 87, p. 16, (2013).

高磁界マグネットの HTS インサート用パンケーキコイルの交流損失評価

AC loss evaluation of pancake coils for HTS insert in high field magnet

梶川 一弘(九大); 淡路 智, 渡邊 和雄(東北大)

KAJIKAWA Kazuhiro (Kyushu Univ.); AWAJI Satoshi, WATANABE Kazuo (Tohoku Univ.)

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

1. はじめに

低温超電導 (LTS) 線は多芯構造を有し、それを密巻した多層コイルの交流損失を見積る際には、各多芯線内のフィラメント領域もしくはフィラメント自身が孤立した状況下の結合損失と履歴損失を積算すれば良いことが知られている[1]。一方、現在市販化されている高温超電導 (HTS) 線はテープ形状をしており、特にテープ面に垂直な磁界の印加による磁化が非常に大きいため、それを密巻したコイル (レイヤー巻コイルあるいはパンケーキ巻コイル) の交流損失を見積るためには、近接する巻線の磁化の影響を考慮する必要がある。そこで、本研究では、東北大で計画されている 25 T 無冷媒超電導マグネットにおける HTS インサート[2]を対象に、その積層パンケーキコイルで発生する初期励磁時の交流損失を評価した。

2. 交流損失理論式の導出

HTS テープ線材を巻線したソレノイドコイルの交流損失を評価するために、ターン毎の交流損失を計算して、足し合わせることにする。また、ターン毎の交流損失は、印加される局所磁界を軸方向成分 B_z (テープ面に平行な磁界) と径方向成分 B_r (垂直な磁界) に分割し、各々の磁界が個別に印加された場合の交流損失を計算して、足し合わせることで評価する[3]。平行磁界損失については、coated conductor 内の超電導層の厚さ d が線材幅 $2a$ に比べて極端に小さいため、幅 d をもつ無限平板とみなして計算する。一方、垂直磁界損失については、テープ間の磁氣的相互作用を考慮する必要がある[4]。つまり、テープ単線に対する交流損失よりは小さく、幅 $2a$ をもつ無限平板に対する交流損失よりは大きくなる。そこで、極限ケースとして両者の交流損失理論式を導出する。ただし、ここでは、初期冷却後を想定し、超電導体内部には磁束が侵入していない状況を初期状態とする。その後、外部磁界 B_e と通電電流 I を一定速度で単調増加 ($dB_e/dt \geq 0$, $dI/dt \geq 0$) する。また、ターン毎の臨界電流密度 J_c は印加磁界の大きさ $|B|$ と角度 θ に依存するとし、その変化速度は単調減少する場合 ($dJ_c/dt \leq 0$) のみを取り扱う。ただし、ある時刻における臨界電流密度 J_c は各ターン内で均一とみなして (Bean モデルを仮定して) 磁界分布を求め、外部磁界 B_e と通電電流 I 、および臨界電流密度 J_c が微量だけ変化したときの交流損失理論式を導出する。

まず、幅 $2D$ をもつ無限平板について、平板単位体積当たりの交流損失 P_{slab} (W/m^3) は、次で表される。

$$P_{\text{slab}} = \left[B_p^2 / (2\mu_0) \right] (p_e + p_i) \quad (1)$$

$$p_e = \begin{cases} b^2 [\dot{b} - (2b/3) \dot{J}] & (0 \leq b \leq 1) \\ \dot{b} - (2/3) \dot{J} & (b > 1) \end{cases} \quad (2)$$

$$p_i = \begin{cases} b(2I - b)\dot{b} + (b^2 + I^2)\dot{I} \\ -2(I^3/3 + b^2I - b^3/3)\dot{J} & (0 \leq b \leq I) \\ I(\dot{I}b + 2b\dot{I} - 2bI\dot{J}) & (b > I) \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 $b = B_e/B_p$, $\dot{b} = (dB_e/dt)/B_p$, $I = I_t/I_c$, $\dot{I} = (dI/dt)/I_c$, $\dot{J} = (dJ_c/dt)/J_c$, $B_p = \mu_0 J_c D$, $I_c = 2J_c a d$ である。(1)式の右辺第1項は外部磁界のみを印加したときの交流損失を表し、右辺第2項は通電電流を同時適用したときに新たに付け加えられる損失分である。

一方、幅 $2a$ 、厚さ d の超電導ストリップ単体について、外部磁界 B_e のみが垂直に印加されたとき、ストリップ単位体積当たりの交流損失 P_{strip} (W/m^3) は、次で表される。

$$P_{\text{strip}} = \left[\pi a B_e^2 / (2\mu_0 d) \right] \left\{ (\tanh \beta - \beta \operatorname{sech}^2 \beta) \dot{\beta} - \beta (2 \tanh \beta - \beta \operatorname{sech}^2 \beta) \dot{J} \right\} \quad (4)$$

ここで、 $\beta = B_e/B_c$, $\dot{\beta} = (dB_e/dt)/B_c$, $B_c = \mu_0 J_c d/\pi$ である。

3. 交流損失の計算結果

HTS インサートと外側の LTS バックグラウンドコイルを同時に 60 分で初期励磁した場合を想定する。HTS インサートを構成する代表的な 2 枚のシングルパンケーキコイル (ターン数 438) について、径方向 (垂直) 磁界のみが印加された場合の理論式による交流損失の計算結果を、有限要素法[4]による数値計算結果と比較して、Fig. 1 に示す。また、HTS インサート全体で発生する交流損失の時間変化を、Fig. 2 に示す。

参考文献

1. K. Funaki and F. Sumiyoshi: "Multifilamentary wires and conductors," Sangyo Tosho, Tokyo (1995) 59–63.
2. S. Awaji, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. 24 (2014) 4302005.
3. Y. Fukuda, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. 13 (2003) 3610.
4. K. Kajikawa, et al.: Physica C 469 (2009) 1436.

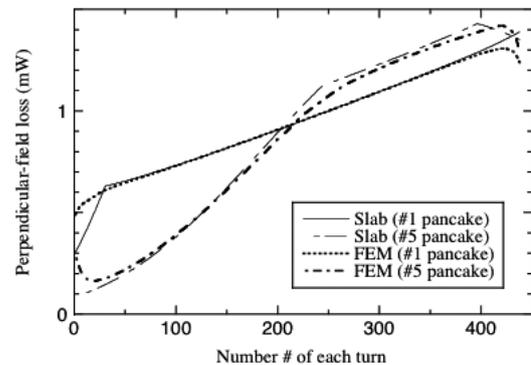


Fig. 1 Comparison between perpendicular-field losses at 60 min for two representative single pancake coils obtained from derived theoretical expressions and finite element method [4].

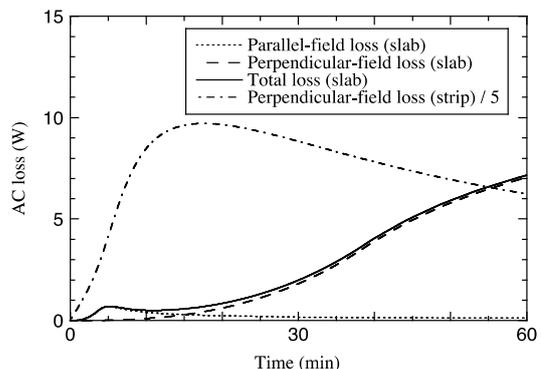


Fig. 2 Estimated AC losses of HTS insert.