

バルク超電導体を用いた大型輸送機器のための MW 級埋め込み永久磁石型同期モータの構造に関する考察

Structure of MW Class IPM Synchronous Motors for Large Transport Equipment Using Bulk Superconductors

寺尾 悠, 赤田 渉, 大崎 博之(東大)

TERAO Yutaka, AKADA Wataru and OHSAKI Hiroyuki (Univ. of Tokyo)

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

1. はじめに

埋め込み永久磁石型同期モータ(IPMSM)は、表面磁石型同期モータ(SPMSM)と比べて突極性を持つことから、マグネットトルクとリラクタンストルクの両方を利用でき、電気自動車や空調をはじめとした様々な分野へ応用されている。本構造へバルク超電導体を用いた「超電導 IPMSM」の場合[1, 2]、永久磁石よりも強い界磁により、またバルクを冷却する真空断熱スペースの取り方を工夫して磁路を考えることにより、マグネット/リラクタンストルクを向上させられる可能性がある。本発表では大型輸送機器への適用を考え、有限要素法による電磁設計を行なった結果を報告する。

2. 超電導 IPMSM の基本仕様

Fig. 1 に超電導 IPMSM の概念図を示す。界磁には残留磁束密度 1.0 T の永久磁石 (PM) 及び内部電流密度の異なるバルク超電導体 3 種を用いる (Table 1)。また Table 2 にモータ寸法を示す。本構造を決定するに当たり JMAG Express を用いて 12 極、モータ直径 1000 mm、軸方向長 1530 mm とした。また界磁の PM、バルクの寸法 (断面積、軸方向長) は同一としている。更に Fig. 1 に示すように、バルク周辺には真空断熱及び冷却用スペースとして鉄芯-バルク間に 10 mm 以上の空間を設けている。

Table 1. Bulk superconductor specifications

Bulk	Current Density in Bulk	Max. Magnetic Flux Density in Bulk
A	$6.3 \times 10^7 \text{ A/m}^2$	2.0 T
B	$7.7 \times 10^7 \text{ A/m}^2$	2.5 T
C	$9.5 \times 10^7 \text{ A/m}^2$	3.0 T

Table 2. Motor dimensions

Number of poles	12
Rotation speed	1900 rpm
Motor diameter	1000 mm
Rotor diameter	784 mm
Effective length	1530 mm
Thickness of PM & bulks	30 mm

3. FEM 解析によるモータの電磁特性

前項での設計内容を基に、JMAG Designer にて 4 種類のモータの電磁界解析を行った。Fig. 2 に電機子電流の位相を変化させた場合のモータ出力、Fig. 3 に 4 種類のモータの損失 (電機子コイル銅損、鉄損) を比較したグラフを示す。Bulk A を用いた場合、内部磁束密度は 2.0 T と PM の 2 倍であるが、真空断熱領域の空隙の分だけ磁束密度が弱まり、出力が PM と同程度 (2.0 MW) になっていることが分かる。一方、Bulk B, C の場合には出力が 3.0 MW、4.0 MW と PM の場合よりもそれぞれ 1.5、2 倍に向上していることが分かる。すなわち超電導 IPMSM が従来の PM より優位性を持つには、何らかの方法により Bulk B 以上の着磁が必要であることがわかる。また損失に関しては銅損の影響は殆どなく (数 kW オーダー)、バルク

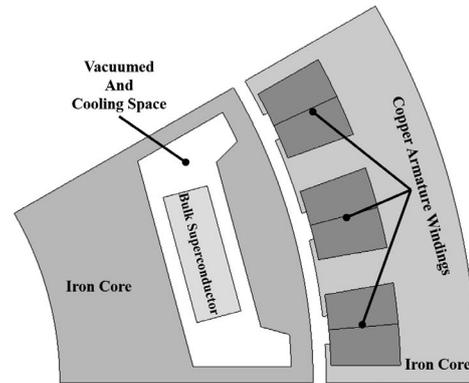


Fig. 1 Cross section of superconducting IPMSM (1/12 model)

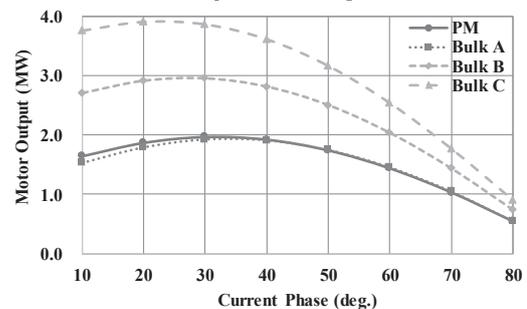


Fig. 2 Motor output as a function of armature current phase.

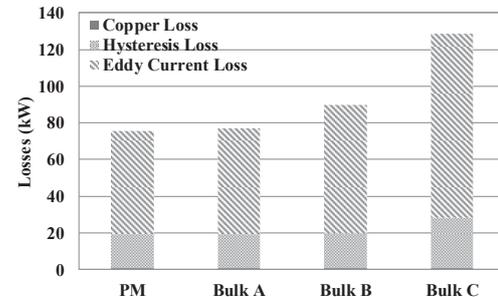


Fig. 3 Motor losses of four IPMSMs.

の着磁磁束密度増加の影響による鉄損 (特に渦電流損失) が顕著である。

4. まとめと今後の課題

4 種類の IPMSM に関して出力、損失等の電磁特性の解析を行った。バルク超電導体の着磁強度や真空断熱構造を上手く工夫することで従来 IPMSM よりも高出力密度とすることが可能である。今後は冷却構造・損失等にも着目予定である。

謝辞

本研究の一部は平成 30 年度科研費 若手研究 (課題番号 18K13737) の支援を受けて行なわれた。

参考文献

- Y. Terao, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol.96 (2018) p.154
- W. Akada, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol.96 (2018) p.136

REBCO 線材を用いた全超伝導同期電動機の特性に及ぼす 電機子巻線構造の影響

Effect of Armature Winding Structure on The Properties of Fully Superconducting Synchronous Motors using REBCO Tapes

東 優樹, 工藤 和真, 川越 明史(鹿児島大学); 岩熊 成卓(九州大学);
今野 雅行, 富岡 章(富士電機); 和泉 輝郎(ISTEC)

Yuki Higashi, Kazuma kudo, Akifumi Kawagoe (Kagoshima University); Masataka Iwakuma (Kyushu University);
Masayuki Konno, Akira Tomioka (Fuji Electric Co.,Ltd.); Teruo Izumi (AIST)

E-mail: k6998039@kadai.jp

1. はじめに

現在、電機子・界磁子巻線ともに超伝導化した全超伝導同期電動機の開発が行われている[1]。特に、電機子巻線の交流損失が、電動機構造によってどのように影響を受けるかは重要である[2]。また一般的には、巻線係数が高い電動機を設計することが、電動機特性の向上には有効である。そのためには、電機子巻線の形状は、レーストラック形コイルよりも、鞍形コイルの方が良い。そこで今回は、EuBCO 線材を用いた 500kW 級全超伝導同期電動機について、電機子巻線構造が電動機特性に及ぼす影響を数値解析によって評価した。運転温度は 65K として解析した。

2. 解析モデルと解析条件

Fig. 1 に今回使用した電機子巻線コイルピッチ 90°解析モデルの 1/4 サイズを示す。電動機モデルは 4 極機とした。解析条件としては、電機子巻線コイルピッチ 30°、60°、90°のモデルを作成し、回転数を 1800rpm とした。また、ギャップ磁束密度 B_g を 1.0[T]、1.5[T]、2.0[T]、2.5[T] の 4 条件で解析を行った。すべての条件において、出力が 500kW となるように電機子起磁力をそれぞれ設定した。交流損失の解析は、まず、JMAG を用いて磁界解析を行い、次に、各要素の単位体積当たりの損失 w_i を Brandt の式を用いて求め、その後、各要素の損失 w_i を体積積分することにより求めた。

3. 解析結果

電機子巻線コイルピッチ 90°、回転数 1800rpm において、各 B_g におけるレーストラック形・鞍形電機子巻線それぞれに印加される最大経験磁束密度の解析結果を Fig. 2 に示す。また回転数 1800rpm、 $B_g=1.0$ [T] において、各コイルピッチにおけるレーストラック形・鞍形電機子巻線で発生する交流損失の解析結果を Fig. 3 に示す。 B_g によらず、電機子巻線をレーストラック形から鞍形にすることによって、電機子巻線の線材幅面に垂直に印加される磁界が減少し、電機子巻線で発生する交流損失が低減されていることが分かる。コイルピッチ 90° の鞍形電機子巻線では他コイルピッチに比べ、大幅に交流損失低減の効果が見込まれる。

4. 鞍形コイルの臨界電流測定

鞍形コイルの実現性を確かめるため、検証実験を行った。まず、 I_c が 104[A] の YBCO 線材を用いて、直線部 80[mm]、コイルエンド部の半径 35[mm] のレーストラック形コイルを 5.5 ターン巻線し、臨界電流測定を行った。その後、レーストラック形コイルの直線部を固定しながら鞍形コイルを作製し、同様に臨界電流測定を実施した。結果、レーストラック形コイルと鞍形コイルの臨界電流を比較すると、どちらも約 80[A] となり、劣化は見られなかった。したがって、レーストラック形コイルから鞍形コイルを作製する際に機械的な劣化は生じず、臨界電流を保つことが出来た。

5. まとめ

500kW 級全超伝導電動機的设计を行い、電機子巻線構造の影響を調べた。電機子巻線をレーストラック形から鞍形にすることで交流損失は低減した。これは、電機子巻線に印加される垂直磁界の減少により、単位体積当たりの損失が低下したためである。また、電機子巻線の I_c 増加による線材量の削減効果も含まれる。以上のことから、鞍形電機子巻線の採用は選択肢の一つになりうると考えられる。

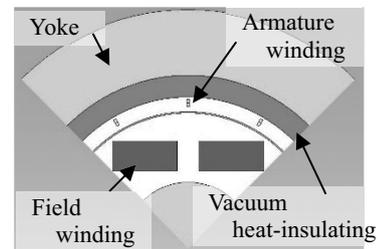


Fig. 1 1/4 FEM Analysis model of armature winding coil pitch 90°

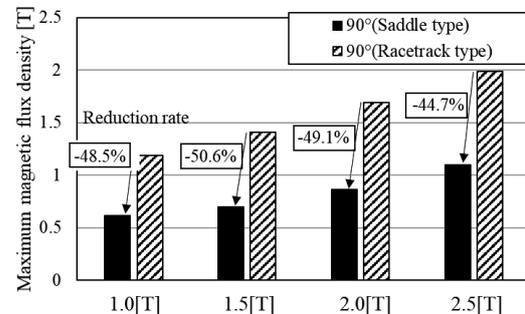


Fig. 2 The maximum experiential magnetic flux density applied to armature winding in each gap magnetic flux

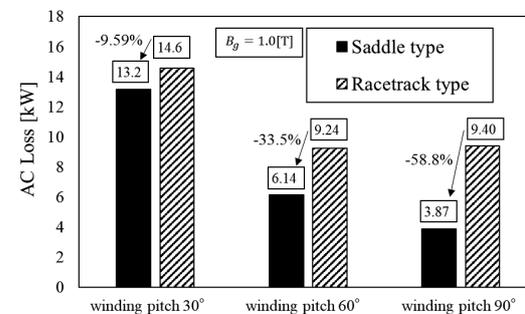


Fig. 3 The AC Loss in each coil pitch

参考文献

1. K. Tamura, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 26, No. 4 (2016) 5206905
2. Y. Higashi, et al.: Abstract of CSJ Conference., Vol. 94, (2017) p. 126

超電導バルク体のピンニング力と磁気吸引・反発力を組み合わせた 磁気浮上型免震装置の基礎検討

Fundamental examination of the magnetic levitation type seismic isolation device combined
magnetic attractive and repulsive force with the pinning force of HTS bulk

佐々木 修平(八戸工業高等専門学校)

SASAKI Shuhei (National Institute of Technology, Hachinohe College)

E-mail: sasakis-e@hachinohe-ct.ac.jp

1. はじめに

地震被害を抑制するために、超電導を用いた磁気浮上型免震装置の開発を進めてきた。これまでの課題として、対象物を支承するための磁気浮上力の改善が求められている。そこで、本研究では、超電導バルク体のピンニング力（復元力）と永久磁石同士による吸引・反発力を同時に利用した場合の磁気浮上力を実測により評価し、高い磁気剛性を有する磁気浮上型超電導免震装置の基礎特性について検討した。

2. 磁気浮上力実験

磁気浮上力が磁束密度の大きさと勾配の積に依存することが分かっている。そこで、磁束密度分布の形状評価のために、永久磁石レールの磁極配列を N 極 S 極交互に配列した Alternate 配列と磁束を中央部に集中させる Halbach 配列を採用した。また、浮上ギャップを確保しつつ磁気浮上力を得るために、浮上部の超電導バルク体の背面に固定側の永久磁石レールと吸引する方向に新たな永久磁石を設け、永久磁石同士の吸引・反発力を同時に利用することを試みた。

磁気浮上力実験のモデルを Fig. 1 に、諸元を Table 1 に示す。超電導バルク体は中心が永久磁石レールの中央と一致するところに配置させ、液体窒素によって冷却した。冷却後、z ステージの変位に対して発生する力を磁気浮上力としてフォースゲージで測定した。なお、超電導バルク体と永久磁石レール間のギャップは 5 mm および 10 mm とした。

3. 磁気浮上力特性結果

ギャップ変化に対する磁気浮上力特性結果を Fig. 2 に示す。Fig. 2 より、ギャップ 5 mm においては Halbach 配列の方が Alternate 配列よりも大きいものの、ギャップ 10 mm では値が逆転している。これは、Alternate 配列は永久磁石レールから離れた位置においても磁束量の減衰が小さいことを意味している。つまり、磁気浮上の応用機器を設計する上で浮上ギャップが必要な場合には、多極化せずに、大きい永久磁石を二極で配列させることが効果的であると考えられる。

永久磁石同士の吸引・反発力を利用した磁気浮上力特性結果を Fig. 3 に示す。Fig. 3 より、浮上部に新たに永久磁石を用いることによって、磁気結合を強めることができ、磁気浮上力を向上させることに成功した。一方で、Alternate 配列に永久磁石の吸引力を用いた場合、浮上部が永久磁石レールに引き寄せられてしまい、安定したギャップで磁気浮上することができなかった。つまり、超電導バルク体の y 方向の復元力が永久磁石同士の吸引力よりも小さいためだと考えられ、浮上部の永久磁石の大きさを小さくする、もしくはギャップを大きくするなどして安定浮上を実現させることが望まれる。

4. まとめ

超電導バルク体の復元力と永久磁石同士の吸引・反発力を組み合わせることによって磁気浮上力を向上させることができるが、浮上安定性を損なう可能性があるため、設計上において適切な条件を見出すことが必要であることがわかった。

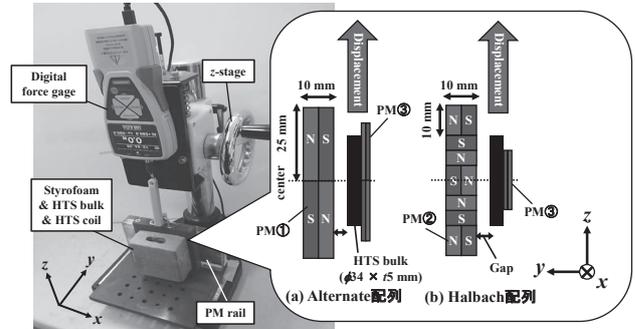


Fig. 1 Magnetic levitation force experimental apparatus

Table 1 Specifications of permanent magnet and HTS bulk

ネオジム永久磁石レール(固定側)①-Alternate 配列	
大きさ	100 × 25 × 10 mm (2本配列)
ネオジム永久磁石レール(固定側)②-Halbach 配列	
大きさ	100 × 10 × 10 mm (5本配列)
ネオジム永久磁石(浮上側)③	
大きさ	40 × 20 × t1 mm
超電導バルク体(GdBCO)	
大きさ	φ 34 × t5 mm

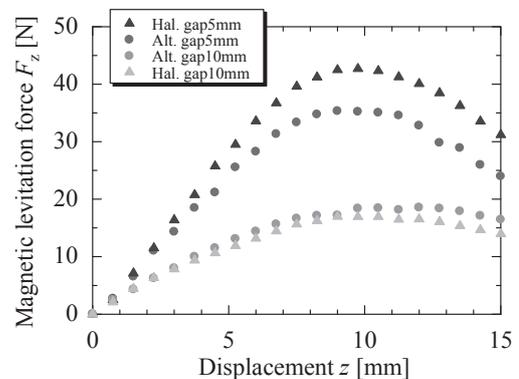


Fig. 2 Magnetic levitation force as a function of levitation gap

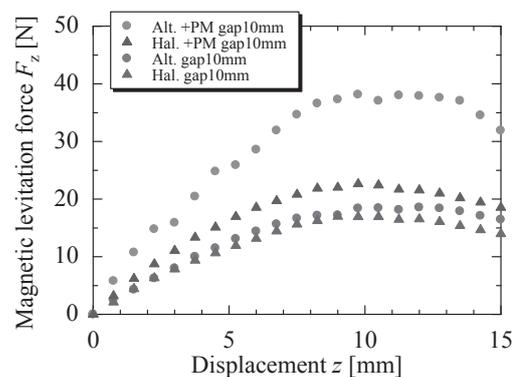


Fig. 3 Magnetic levitation force with/without attractive force between permanent magnets

Development of Prototype Superconducting Diode Element Using REBCO Films with Asymmetric Critical Current

TSUCHIYA Yuji, SUZUKI Keisuke, ICHINO Yusuke, YOSHIDA Yutaka (Nagoya Univ.)
E-mail: tsuchiya@nuee.nagoya-u.ac.jp

1. Introduction

A superconducting diode with an asymmetric critical current has been proposed as a novel rectifying element operating at cryogenic conditions [1]. It has an opposite I - V characteristic to the conventional semiconductor diode and is expected to be used for the application such as AC-DC conversion, fault current limiter, and superconducting electronics. However, little has been reported on rectifying properties in high-temperature superconducting $REBa_2Cu_3O_y$ (RE : rare earth, REBCO) films, so further research is needed [2].

Recently, we reported that $BaHfO_3$ (BHO)-doped $SmBCO$ film showed asymmetric critical current characteristics in an in-plane magnetic field [3]. The asymmetry becomes maximum at external magnetic field of 0.2-0.3 T. However, an external magnetic field generated by superconducting magnet is needed to obtain the asymmetric I_c . For applications, it is necessary to develop superconducting diode elements which operates without external magnetic field. In this study, we have developed a prototype of superconducting diode element made of the REBCO films which operates in liquid nitrogen without an external field.

2. Experimental method

Prototype superconducting diode element consists of the REBCO film, Cu leads, neodymium magnets, and a polyacetal holder as shown in Fig. 1. $BaHfO_3$ -doped $SmBa_2Cu_3O_y$ films were fabricated on $LaAlO_3$ substrates with thicknesses of 1200 nm using a pulsed laser deposition method. The film was processed into micro bridges with a width of 100 μ m and a length of 1 mm. A Ag protection layer of 400 nm was deposited on the REBCO film. The film was pressed onto the polyacetal holder via two Cu leads with In foils. An in-plane field of 0.4 T was applied to the REBCO film using two neodymium permanent magnets assembled in the element, which was designed based on the analytical charge model.

The developed element was cooled in liquid nitrogen without any external field. Output voltage was measured by using a nanovoltmeter (Keithley 2182A) with applying a sine wave alternating current by using a bipolar precision power amplifier and a function generator (NF 4505, WF1973) up to 2 A with a frequency up to 1 Hz.

3. Results and discussion

The REBCO film had I_c of 0.6 A at 77 K and at an in-plane field of 0.4 T, which corresponds to J_c of 0.5 MA/cm². Fig. 2 shows time dependence of output voltage and normalized current for the diode element at the liquid nitrogen temperature with amplitude of AC current from 0.7-1.5 A with a frequency of 0.12 Hz. The amplitude of the output voltage was larger for the positive side while the amplitude of the applied current was symmetric such as 6.3 mV and -5.4 mV for the current of 1.5 A. It indicates that I_c in the superconducting diode was small for the positive direction where the in-plane vortex penetrated into the REBCO film from the bottom side.

The output voltages were time-averaged to calculate DC voltage. The inset of Fig. 2 shows averaged DC voltage with varying the amplitude of the applied AC current. DC sub-millivolt output such as 0.3 mV was obtained for the alternating current exceeded the I_c . Finally, the prototype element of the superconducting diode showed the rectification characteristic

without an external field at liquid nitrogen temperatures. Improvement of rectification characteristics and current capacity are future tasks.

On site, we will discuss the causes of asymmetry towards superconducting diodes that show more efficient rectifying characteristics.

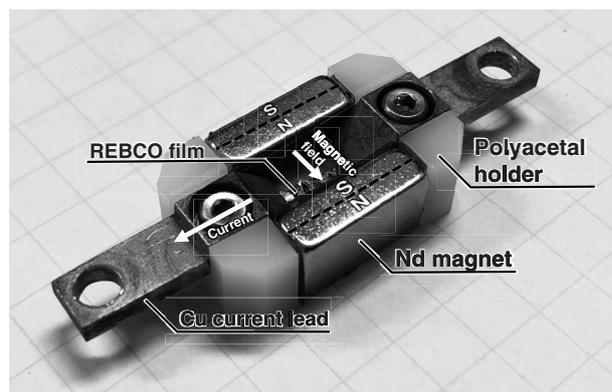


Fig. 1 Photograph of a superconducting diode made consisting a REBCO films, Nd magnets, Cu current lead, and a polyacetal holder.

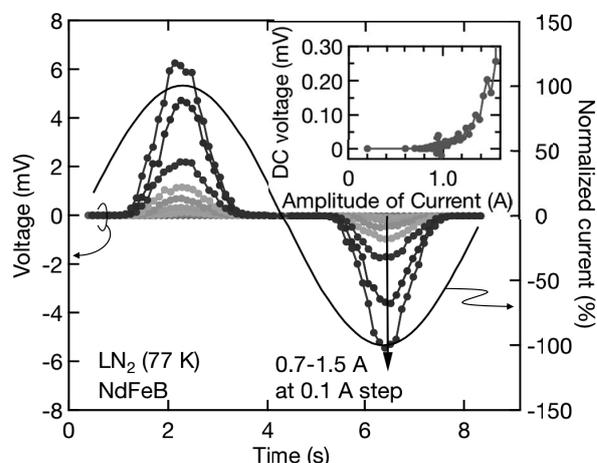


Fig. 2 Time dependence of output voltage and normalized applied current up to 1.5 A at a frequency of 0.12 Hz in the superconducting diode element at liquid nitrogen temperature. The inset shows averaged DC voltage with varying the amplitude of the applied AC current.

Acknowledgement

This research was partly supported by JST-ALCA, KAKENHI (15H04252, 16K20898).

References

- [1] X. Jiang *et al.*, Phys. Rev. B **49**, 9244 (1994).
- [2] S. A. Harrington *et al.*, Appl. Phys. Lett. **95**, 022518 (2009).
- [3] Y. Tsuchiya *et al.*, Abstracts of CSJ Conference, **96** (2018) 24.

高温超電導コイルを用いた鉄道用非接触給電システムの 低周波領域における電力伝送特性

Power Transmission Characteristics in Low-frequency region of a Wireless Power Transmission System Using HTS Coils for Railway Vehicles

井上 良太 (東北大, 日本学術振興会特別研究員 DC); 五十嵐 健太, 長崎 陽, 宮城 大輔, 津田 理, 松木 英敏 (東北大)
INOUE Ryota (Tohoku Univ., JSPS Research Fellowships for Young Scientists DC);
IGARASHI Kenta, NAGASAKI Yoh, MIYAGI Daisuke, TSUDA Makoto, MATSUKI Hidetoshi (Tohoku Univ.)
E-mail: ryota.inoue.q3@dc.tohoku.ac.jp

1. はじめに

近年, 蓄電池技術の進歩に伴い, 架線のフリー化を目指して, 鉄道用非接触給電システムの導入が期待されている。その一方, 既存のシステムは, 数 100 kW 級の電力を 10 kHz 程度で伝送するため, 1 次側および 2 次側コイルの発熱によって長時間運転に課題があることやレール等に発生する渦電流損によって伝送効率が低下することが問題となっている [1-2]。これらを解決する方法の 1 つとして, コイル自身の低ロス化に加えて動作周波数の低周波化が考えられる。しかし, 銅コイルを用いる場合は, 低周波化するほど伝送効率の指標である Q 値が低下するため, コイル自身の発熱を抑えて大電力伝送を行うことが難しい。そこで, 本稿では, 低周波領域 (数 kHz 以下) においても Q 値の低下が少ない高温超電導コイルを鉄道用非接触給電システムに適用することを考え, 低周波領域における電力伝送特性について検討した。

2. 解析条件

公益財団法人鉄道総合技術研究所 (以下, 鉄道総研) では, 300 kW 級の鉄道用非接触給電が検討されており, 近年では, 実車にミニモデルの非接触給電装置を搭載し, 1.2 m×0.8 m の空間に約 40 kW (10.8 kHz) を給電する実験が行われている [2]。そこで, 鉄道用非接触給電システムに HTS コイルを適用する場合の有効性を評価するため, 鉄道総研で行われている給電実験の結果と HTS コイルを適用する場合の解析結果を比較することにした。そのため, 受電電力量, 負荷, 負荷電圧, コイル間ギャップは, 鉄道総研のミニモデルと同様とした。なお, 動作周波数は鉄道総研のミニモデルの 2 分の 1 以下となる 4.3 kHz とした。Table 1 に解析条件を示す。ここで, HTS コイルの形状は単純化のため, シングルパンケーキ形状 (0.8 m×0.8 m) とした。また, 様々な運転温度における伝送効率 (交流損失) と冷凍機による消費電力を含めた効率の関係性を明らかにするため, 運転温度を 40 K, 50 K, 77 K とした。ここで, 冷凍機による消費電力は HTS コイルで発生する交流損失の 35 倍 (40 K), 25 倍 (50 K), 12 倍 (77 K) とした [3]。また, HTS コイルの解析には 2 次元軸対称の有限要素法 (H 法) を用いた。なお, Kim モデルを用いて J_c -B 特性を考慮している。

3. 結果および考察

Fig.1 に HTS コイルを用いた非接触給電システムの伝送効率の解析結果および鉄道総研における実験結果 (レールや整流器等のロス is 考慮しない) を示す。Fig.1 より, HTS コイルの伝送効率は, 冷凍機の運転温度に関わらず, 95% 以上となり, コイル自身の発熱を抑制できることがわかった。また, HTS コイルを用いる場合は, 動作周波数をミニモデルの 2 分の 1 以下に低減できるため, レール等に発生する渦電流損や変換器に発生するスイッチング損失は減少すると考えられる。一方, 運転温度の上昇と共に, HTS コイルの交流損失が増加 (電流負荷率が上昇) し, 冷凍機の消費電力を含めた効率は, Cu コイルの伝送効率よりも低くなることが確認された。このため, HTS コイルに発生する交流損失を低減する必要があるが, 77 K における線材の臨界電流密度 (3.0×10^{10} A/m²) が, 現

在の 4 倍程度になれば, Cu コイルの場合よりも, 高効率での伝送が可能になることがわかった。今後は, HTS コイルの低損失化および漏洩磁場による漂遊負荷損の影響について検討する予定である。

謝辞

本研究は, JSPS 科研費 (JP17J02242) の助成を受けたものである。

Table 1. Specifications of Wireless Power Transmission model system.

	HTS coil (Analysis)	Cu coil [2] (Experiment)
Receiving power P_L [kW]		38.7
Mechanical gap length [mm]		75
Load resistor R_L [Ω]		7.2
Resonance frequency f_0 [kHz]	4.3	10.8
Circuit topology	SS	SP
HTS layer [μ m]	2	-
Tape width [mm]	5	-
n value	30	-
Kim parameter B_0 [T]	0.5	-
Coil shape	Single pancake coil	Figure-of-eight
Coil inner diameter [mm]	700	-
Coupling coefficient	0.3	0.21
Size [m ²]	0.8 × 0.8	13.2 × 0.8
Primary coil Number of Turns N_1	20	1
Self-inductance L_1 [μ H]	880	59
Primary capacitor C_1 [μ F]	1.53	4.4
Secondary coil Size [m ²]	0.8 × 0.8	1.2 × 0.8 (3 coils)
Number of Turns N_2	20	4
Self-inductance L_2 [μ H]	880	61 (1 coil)
Secondary capacitor C_2 [μ F]	1.53	4.2

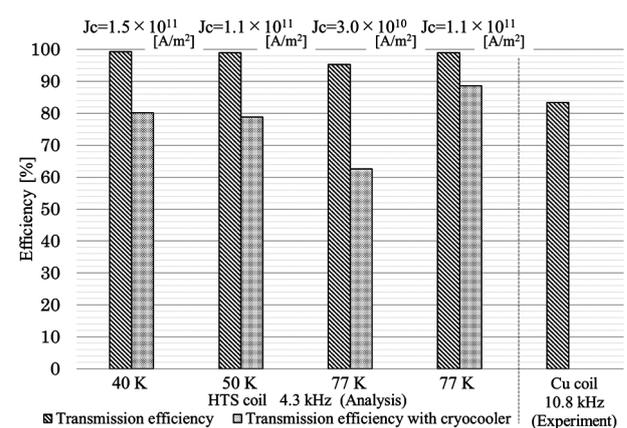


Fig.1 The Efficiency of the wireless power transmission system as a function of the resonance frequency.

参考文献

- [1] K. Yamamoto, et al. : *IEEJ Trans.*, vol.133, No.3 pp.378-385 (2013)
- [2] K. Ukita, et al. : 2015 *IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power (2015 WoW)*, 978-1-4799-6610-3
- [3] Y. F. Bi : *Applied superconductivity and electromagnetics*, Vol.4, No.1 (2013)
- [4] R. Inoue, et al. : *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol.27, No.1(2017) 5400106

浮上式鉄道用 RE 系高温超電導磁石の開発 -地上コイルの電磁加振に向けた事前検証-

Development of REBCO Magnet for Maglev

-Verification of the REBCO Magnet for the Electromagnetic Vibration tests-

水野 克俊, 田中 実, 小方 正文(鉄道総研)

MIZUNO Katsutoshi, TANAKA Minoru, OGATA Masafumi (RTRI)

E-mail: mizuno.katsutoshi.14@rtri.or.jp

1. はじめに

鉄道総研では、RE 類系高温超電導磁石の開発を進めており、浮上式鉄道に応用できれば運用温度を高く設定できるため、寒剤不要・冷凍機消費電力低減・磁石軽量化などの利点が得られる。実機大 RE コイルの製作・励磁に加え、振動に伴う発熱評価もすでに行っており[1, 2]、コイルとしての性能は実証されつつある。しかしながら、コイル単体ではなく、外槽容器や冷凍機、制御・保護システム等まで含めた「超電導磁石」としての完成度を高めていくことが実用化へ向けては不可欠である。外槽容器を設計・製作して磁石の組み立てを行うとともに、地上コイルの評価試験(電磁加振試験)用途での運用に向けた事前検証を行ったので報告する。

2. 電磁加振試験について

浮上式鉄道の研究開発においては、励磁した超電導磁石に対向して地上コイルを配置し、交流通電することによって加振する試験(以下電磁加振試験)が地上コイルの耐久性評価に用いられる[3](Fig. 1)。電磁加振試験においては、超電導磁石に実機同様の仕様が求められるため、開発を進めている RE 磁石を有効活用できるだけでなく、長期運用実績・ノウハウを蓄積することができる。電磁加振試験に向けて組み立てた RE 磁石の外観写真を Fig. 2 に示す。外槽容器は削り出しのアルミ合金製であり、現状ではコイルは 1 極であるが、将来的に 2 極目のコイルを搭載可能で、進行方向断面で比較すると実機よりも 40 %程度小型化されている。なお、変動磁界による渦電流発熱は、十分に小さいことを数値解析によって確認している。冷却には単段 GM 冷凍機(住友重機械製:RDK-500B)を用いており、約 3 日で冷却は完了する。

3. 保護システムの検討

組み立てた RE 磁石の励磁確認試験と並行して、無人運転を想定した保護システムの検討を行った。本コイルは蓄積エネルギーが大きく(375 kJ)、熱暴走後の保護は極めて困難であると予想される。そのため、熱暴走前に異常を検知して励磁電源を制御することが現実的な運用方法であると考えられる。真空度や温度だけでなく、コイル電圧監視も行うものとし、そのためには高精度の電圧測定が必要である。本コイルはパンケーキコイル 8 積層で構成されており、対称位置のパンケーキコイル(例えば#1, #8)の電圧差を見ることで熱暴走前の電圧上昇を検知できる見込みがある。Fig. 3 に定格 250 A 通電時におけるパンケーキコイル#1, #8 の電圧とその差分の変動を示す。対称位置であるため、ノイズ(電源リップル, 外部磁場)だけでなく遮蔽電流の減衰傾向も類似しており、定格電流到達直後(0 s)から差電圧は安定している。約 1 時間電流をホールドしても差電圧は、突発的なノイズを除けば、 ± 0.1 mV の範囲を保持しており、熱暴走前の電圧上昇は十分に検知可能であると考えられる。詳細は当日報告する。

本研究の一部は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施した。

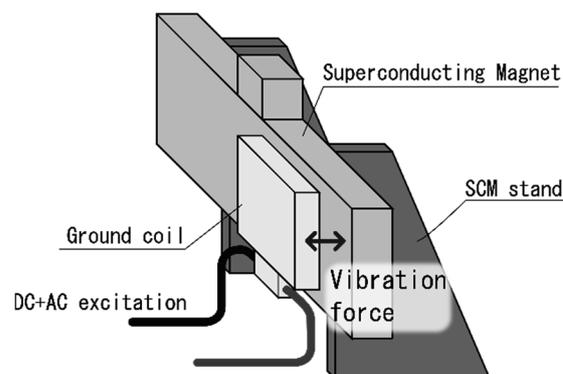


Fig.1 Electromagnetic vibration test of a ground coil



Fig.2 REBCO magnet for the electromagnetic vibration tests

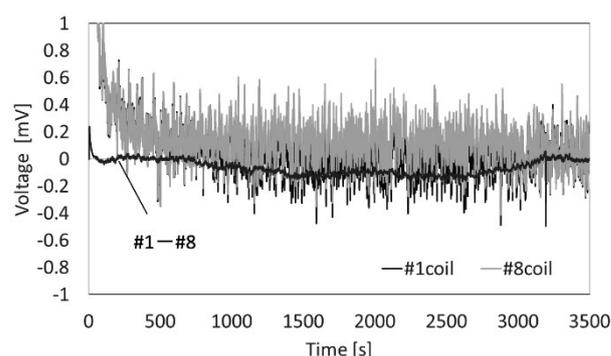


Fig.3 Voltage fluctuations of the pancake coils and their differential during the excitation

参考文献

1. K. Mizuno, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 93 (2016) p.9
2. K. Mizuno, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 94 (2017) p.1
3. M. Tanaka et. al., : Abstracts of J-RAIL'04 (2004)pp. 135-136

MgB₂ ラザフォードケーブルによるコイル試作・励磁 Fabrication and Excitation of MgB₂ Coils Wound by Rutherford Cables

駒込 敏弘, 塚田 謙一, 星野 昌幸, 濱島 高太郎(前川); 横田 康博, 新富 孝和(KEK); 高尾 智明, 谷貝 剛(上智大); 津田 理, 宮城 大輔(東北大); 平野 直樹(中部電力); 富田 優, 恩地 太紀(鉄道総研); 繁森 敦, 中島 健太郎(岩谷産業)

KOMAGOME Toshihiro, TSUKADA Kenichi, HOSHINO Masayuki, HAMAJIMA Takataro (Mayekawa MFG. Co., Ltd.);

MAKIDA Yasuhiro, SHINTOMI Takakazu (KEK); TAKAO Tomoaki, YAGAI Tsuyoshi (Sophia Univ.);

TSUDA Makoto, MIYAGI Daisuke (Tohoku Univ.); HIRANO Naoki (Chubu Electric Power Co., Inc.);

TOMITA Masaru, ONJI Taiki (RTRI); SHIGEMORI Atsushi, NAKAJIMA Kentaro (Iwatani Corp.)

E-mail: toshihiro-komagome@mayekawa.co.jp

1. はじめに

先進超電導電力変換システム (ASPCS: Advanced Superconductivity Power Conditioning System) は、再生可能エネルギーによる発電電力の変動の短周期成分を超電導磁気エネルギー貯蔵装置 SMES に、残りの長周期成分を水素貯蔵系に貯蔵・放出することで、安定した電力を系統や負荷に供給可能とするシステムである。ASPCS では、液体水素貯蔵と SMES の液体水素冷却を組み合わせることで、変動のある大容量エネルギーをコンパクトに貯蔵することができる。

本システムの実用化に向け、SMES に用いる超電導導体の価格低減がポイントとなる。MgB₂ は液体水素温度域で利用可能で、将来の価格低減が期待されるため、本開発では MgB₂ 導体を使用することとした。本開発の主要な技術課題は、MgB₂ 素線の大電流導体化、コイル化および液体水素による冷却である。

本研究では、先ず、React & Wind 法と Wind & React 法で MgB₂ コイルを製作し、次に、MgB₂ ラザフォードケーブルを巻線してダブルパンケーキコイルを製作した。

本発表では、製作コイルの定格電流励磁結果および 15A/s の掃引速度での励磁結果を報告する。

2. MgB₂ 導体およびコイル製作

本研究では、コイル巻線後に熱処理をする W&R 法(小型コイル向け)、および熱処理後にコイル巻線をする R&W 法(大型コイル向け)の2種類の方法でコイルを製作した。W&R 法で製作したダブルパンケーキコイル(DP1)用および R&W 法で製作したコイル(DP2)用の導体構造を Fig.1 に示す。導体製作において、W&R 法では、HyperTech 社製の MgB₂ 素線 30-NM を 8 本と CuZn を安定化銅コアに巻き付け、R&W 法では、同社製 24-NM 素線 10 本で大電流容量を有するラザフォード導体を構成した。MgB₂ 素線は、熱処理の前後でそれぞれ許容歪みが存在し、Nb₃Sn と同様に、導体化およびコイル化時の歪みを管理する必要がある。675°C 前後の熱処理で超電導体が生成され、熱処理後の素線の許容歪みが熱処理前の約 4% から約 0.23% と 1/10 以下になる。素線の曲げ歪みは、導体形状、ケーブルの撚りピッチ、熱処理時の導体曲げ径、コイル巻線径等に依存する。導体製作からコイル巻線の各製作工程で、歪みが許容値を上回らないよう、撚りピッチ等の加工条件を設定した。

製作した各コイルの諸元を Table1 に示す。各ダブルパンケーキコイルの内径と外径は各 400 と 606mm である。

3. 製作コイルの励磁試験結果

R&W および W&R の 2 個の DP コイルを電気的に直列接続し、磁場測定用のホール素子をコイル近傍に設置して、液体ヘリウム中に浸漬冷却して励磁試験を実施した。その結果、Fig.2 に示すとおり、定格電流 600A での励磁をすることができた。また、定格を上回る 700A 励磁も行い、通電で生じるブープ力をコイル構造で支持できていることも確認した。更に、10A/s および励磁電源の限界である 15A/s の掃引速度で励

磁電流を定格まで増加させ、ホール素子で観測した磁場が掃引速度によらず励磁電流で定まることから、コイル内部での部分的短絡が生じていないことを確認した。

4. まとめ

製作した 2 種類の MgB₂ コイルは、いずれのコイルも液体ヘリウム浸漬冷却環境で定格通電を行うことができた。

今後は、残り 3 つの DP コイルの製作・検証および液体水素間接冷却装置を開発し、液体水素温度における MgB₂ コイルの性能検証を目指す。

謝辞

本研究の一部は、JST 先端的低炭素化技術開発事業 (JPMJAL1002) の委託を受け実施した。

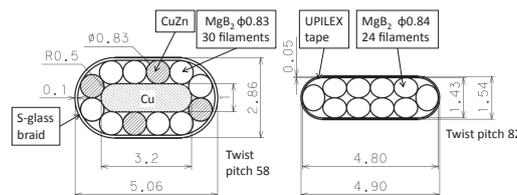


Fig.1 Structures of MgB₂ conductors

Table 1 Specification of MgB₂ Coil

	DP1	DP2
Winding method	W&R	R&W
Inner Diameter	400 mm	
Outer Diameter	606 mm	
Number of turn	72	110
Rated Current	600 A	
Stored Energy	4.3 kJ	

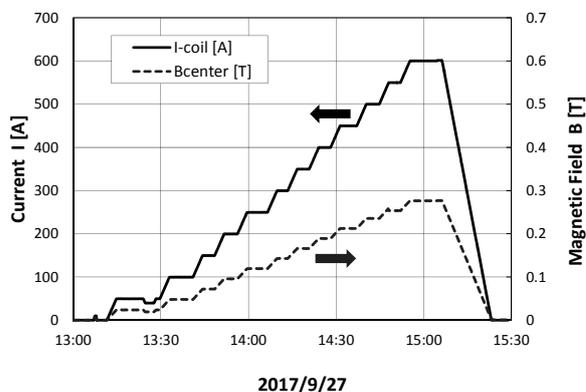


Fig.2 Result of Excitation of MgB₂ Coil

運転中の高温超伝導巻線に生じた異常の診断法2 ～ピックアップコイル設置位置の影響～

Diagnosing method of abnormal conditions produced in the HTS windings under operation –The effect of the positions of a pick-up coil–

細田 啓太, 鶴田 絢也, 川越 明史 (鹿児島大学)

HOSODA Keita, TSURUTA Junya, KAWAGOE Akifumi (Kagoshima University)

E-mail: K41027@kadai.jp

1. 背景

高温超伝導機器の実用運転の際には、機器の健全性を常時監視しておく必要がある。また、機器の生産性やメンテナンス性の観点から、測定系は、高温超伝導巻線から離れた室温空間に設置することが望ましい。我々は、高温超伝導巻線に対し非接触のピックアップコイルを用いることで、巻線の健全性を診断するシステムの開発を行っている。本システムでは、巻線の交流損失特性に対応した電磁エネルギーの流れ(エネルギーフロー、以下 EF とする)を観測することによって、巻線の臨界電流を推定し、異常診断を行う。そのためには、測定された EF と巻線の臨界電流の関係を定量的に把握することが必要である。

これまでに、直径 70mm の 1 ターンコイル状サンプルについて、サンプルから数 mm 離れた場所で測定し、交流通電時、交流磁界印加時のどちらの場合でも、測定値から臨界電流の変化を推定できることを実験的に示している[1,2]。今回は、実用化において妥当な測定系設置位置を検討するために、サンプルからさらに離れた場所で印加磁場中における測定を行った。

2. 本診断システムの概要

我々の提案する異常診断システムは、サンプルの信号測定用ピックアップコイル(PC_E)と、印加磁場検出およびサンプル信号の誘導性電圧キャンセル用ピックアップコイル(PC_H)を用いて、サンプルの局所電界と印加磁場の外積を1周期積分することで EF を求める。

EF は交流損失に起因するので、巻線に何らかの異常が生じて臨界電流が変化すると、交流損失特性の変化に伴った EF の変化が観測されるため、これを精度よく観測することで巻線の異常の診断が行える。

3. 実験方法と条件

本実験では、サンプルの臨界電流を変化させるために温度を変化させた。そのために、外部磁場印加用マグネット内に内挿デュウを挿入し、サンプルをその中にセットし、内挿デュウ内の気圧を変化させて、温度を変化させた。

ピックアップコイル対である測定系は、Fig.1 に示すように、N をサンプルから 2mm、M を 15mm、F を 30mm 離れた位置に設置した。それぞれの位置ごとに温度を変えた状態で磁場依存性の測定を行った。測定系の位置が N の時は 50Hz、M・F の時には 10Hz とした。磁場振幅は 100~700Gauss とした。温度は 77.3K、72K、67K の3条件とした。

サンプルに使用した線材は、Bi-2223 多芯テープ線材で、77.3K、自己磁場中の I_c が 115A のものである。今回はこの線材を内径 70mm のパンケーキ状に 9.5 ターン巻いたものをサンプルとした。

4. 結果

測定した EF の印加磁場依存性を Fig.2 に示す。横軸は、印加磁場振幅(B_m)を中心到達磁場(B_p)で規格化した磁界(Normalized Magnetic Fields)とし、縦軸は、測定された EF を B_p^2/μ_0 で規格化した規格化 EF (Normalized Energy Flow) とし

た。規格化 EF がピーク値をとるときの B_m を B_p とした。それぞれの測定場所の結果は、一本の特性曲線に乗っている。また、得られた B_p は、77.3K、72K、67K で、それぞれ、370Gauss、480Gauss、580Gauss 程度であり、測定場所を変えても同じになった。以上のことから、サンプルから離れても同様の方法で臨界電流の推定が可能であることが示された。なお、線材特性から 77.3K 時の臨界電流が 115A であるので、72K、67K においては、それぞれ、149A、180A と推定できる。これは温度変動時の I_c 測定とよく一致した。

5. まとめ

高温超伝導コイルの健全性を診断するシステムを開発するために、測定信号と巻線の臨界電流の関係を調べている。今回は、Bi-2223 多芯テープ線に外部磁場を印加して、それぞれの位置に設置したピックアップコイル対で測定した。その結果、測定信号の磁場依存性は設置位置に依らなかった。このことから、サンプルから離れた位置で測定しても臨界電流を推定できることがわかった。

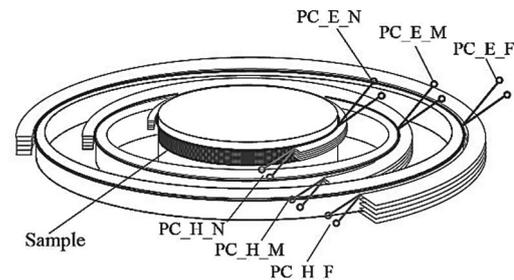


Fig. 1 Sample set up

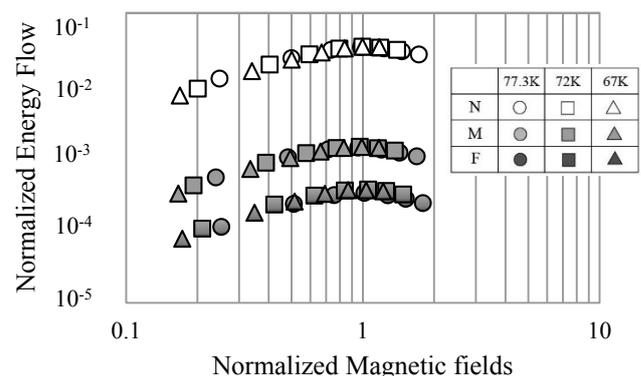


Fig. 2 Normalized magnetic Fields dependence of Normalized energy flow

参考文献

1. K. Hosoda, et al.: Abstract of CSJ Conference, Vol. 94(2017) p. 123
2. A. Kawagoe, et al.: Abstract of CSJ Conference, Vol. 95(2017) p. 153

高温超電導コイルの巻線内電磁力解析

Numerical simulation on electromagnetic force and stress in HTS tape in coil winding

植田 浩史, 徳永 佳祐, 盛川 瑛亮, 小泉 智暉, 金 錫範(岡山大学)

UEDA Hiroshi, TOKUNAGA Keisuke, MORIKAWA Eisuke, KOIZUMI Tomoaki, KIM SeokBeom (Okayama Univ.)

E-mail: hiroshi.ueda@okayama-u.ac.jp

1. はじめに

高磁場は物質・材料系の物性研究や高エネルギー物理などの科学技術分野や医療分野に利用される。現在、高温超電導線材を用いた高磁場マグネットの研究開発が世界各国で進んでいる。高温超電導 DC マグネット応用としては、研究用高磁場コイル、核磁気共鳴(NMR)、磁気共鳴イメージング(MRI)、加速器(サイクロトロン、ビーム輸送系)、超電導磁気エネルギー貯蔵装置(SMES)などが挙げられる。しかし、REBCO 線材はテープ形状をしているため、遮蔽電流が誘導され不整磁場の発生する要因となる。空間的、時間的に磁場均一性や磁場分布が求められる MRI や医療用加速器などの医療機器への適用に際しては、この遮蔽電流が問題となる[1][2]。さらに、誘導された遮蔽電流により、テープ線材の幅広面に不均一な電磁力がかかり、テープ線材とコイルの劣化に繋がることが考えられる。実際、1974 年の CERN の BEBC 超電導マグネットの故障要因として LTS テープ線の遮蔽電流が挙げられている[3]。そこで、今回は、REBCO コイルを対象に巻線内の電磁力解析を行った。

2. 解析モデルコイル

解析対象のコイルは、幅4 mm、厚さ0.1 mm(超電導層1.0 μm)のREBCO線材をシングルパンケーキ巻きで巻いたもので、諸元をTable 1に示す。このコイルは245 A 通電時にコイル中心磁場は11.5 T発生する。

3. 遮蔽電流磁場解析

REBCO 超電導線材は超電導層の断面アスペクト比が非常に大きいことから、線材厚み方向で電磁場が一樣であると仮定する近似を用いて、積分方程式、高速多重極法や超電導特性を考慮可能な非線形有限要素法を組み合わせた三次元電磁場数値解析を用いて計算を行った[4]。超電導特性(I - V 特性)は n 値モデルを採用した。通電パターン、245 A まで1 時間で励磁し、通電したままホールドした。Fig. 1 にコイル中心における遮蔽電流磁場の計算結果を示す。245 A 通電時で0.57 Tの遮蔽電流磁場が発生している。Fig. 2 にコイル断面における巻線内の電流分布を示す。遮蔽電流の影響により、コイル上部になるほどのパンケーキコイルで電流が巻線先端に偏っていることがわかる。

4. 巻線内電磁力

テープ線材の遮蔽電流は、線材内の電磁力分布の著しい不均一性を生じるため、線材が捻れたり、座屈するような電磁力が発生する。Fig. 3にコイル断面における巻線内の電磁力分布を示す。遮蔽電流により、テープ線材の幅方向に電磁力分布が発生する。遮蔽電流による電流分布の偏りのため、電磁力は線材内で不均一に分布し、同じ線材内で逆向きにはたらく箇所もある。Fig. 3(a)から、電磁力は同じテープ線材内で径方向外側と内側にはたらくため、テープがよじれるような力がはたらく。また、Fig. 3(b)から、軸方向の電磁力はテープを圧縮するようにはたらくため、座屈するような力がはたらく。

線材内の応力分布については当日報告する。

謝辞

本研究の一部は、科研費基盤研究C(16K06222)および東電記念財団研究助成(基礎研究)に依ったことを付記する。

Table 1 Specifications of REBCO model coil.

Inner diameter (mm)	50
Outer diameter (mm)	129
height (mm)	110
Turns / Single pancake	240
Number of single pancakes	22
Transport current (A)	245
Magnetic field at center (T)	11.5

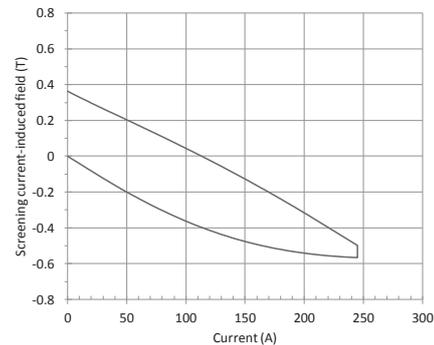


Fig. 1 Numerical results of screening current-induced field at center.

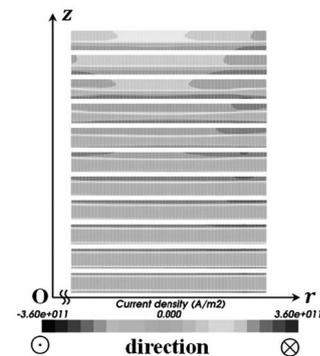


Fig. 2 Cross-sectional view of current distributions in HTS winding.

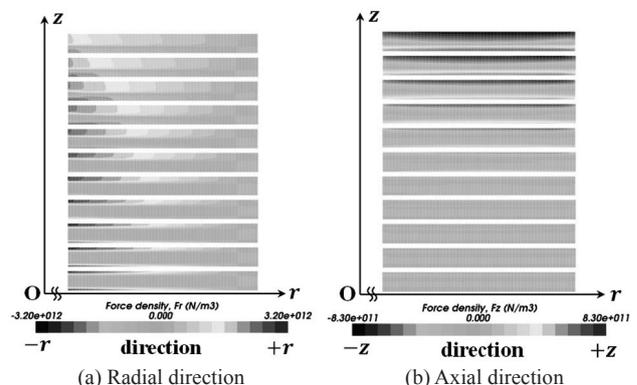


Fig. 3 Cross-sectional view of electromagnetic force distributions in HTS winding.

参考文献

1. Y. Yanagisawa, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., 20, 744-747 (2010).
2. 粟津他, 2018年度春季低温工学・超電導学会講演概要集
3. 低温工学, vol. 9, No .6 (1974) pp. 265-267.
4. H. Ueda, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., 24, 4701505 (2014).

短尺線材を用いた模擬的実験による局所的劣化に起因する伝導冷却薄膜線材マグネットのクエンチに対する保護の検討

Experimental study using short pieces of coated conductor on protection of quench induced by local degradation

羅 熙捷, 井上 寛(京大); 曾我部 友輔(京大・学振 DC1); 雨宮 尚之(京大)
 LUO Xijie, INOUE Satoru (Kyoto University); SOGABE Yusuke (Kyoto University, JSPS DC1);
 AMEMIYA Naoyuki (Kyoto University)
 E-mail: x-luo@asl.kuee.kyoto-u.ac.jp

1. 背景

線材作製過程、巻き線過程などの不具合に起因し、薄膜線材で巻いたコイルに局所的劣化が生じる場合がある。通電中局所劣化部は発熱原因になり、マグネットのクエンチを起こす原因になる可能性があるが、局所劣化部を検出することが困難である。本研究では、短尺線材を用いた模擬的実験により、局所的劣化に起因する伝導冷却薄膜線材マグネットのクエンチ(熱暴走)とその保護について検討した。

2. 実験方法

SuperPower 社で製造された線材(SCS4050)を切り出し、長さ 230 mm の短尺線材サンプルで実験を行った。サンプル上の電圧タップ、セルノックス温度センサなどの位置を Fig. 1 に示す。

実験の手順は以下の通りである。

1. 試料に所定の磁界を印加する。
2. 試料の温度を所定の値に制御し、臨界電流を測定する。
3. 所定の電流を流し、サンプル外側のセルノックス温度センサ(CX1, CX2)の温度を所定の値に制御する。
4. 通電電流をホールドする。
5. 一定時間ホールド後サンプル電圧、温度が安定になれば通電電流を 5 A ずつあげる。
6. Fig. 2 に示した通り、通電電流をホールド中に試料全体(全電圧)の電圧が所定の値(検出電圧)になった後(マグネットのクエンチ検出を模擬)、所定の遅延時間待って(遮断器動作までの遅れなどを模擬)、試料電流をあらかじめ設定した時定数で指数関数減衰させる(外部抵抗によるエネルギー吸収時の電流減衰を模擬)。
7. 試料の劣化の有無を調べるため、臨界電流を測定する。

以上の手順の実験を、局所的劣化を有する複数のサンプルで行った。これらのサンプルは劣化の度合いが異なり、劣化後の臨界電流が異なる。また、局所的・過渡的熱擾乱に起因するクエンチの保護試験も行った。その場合、常伝導を発生させるためクエンチヒータを使用し、クエンチ後劣化がない場合に、通電電流を上げて劣化・焼損するまで実験を行った。

3. 実験結果

局所的劣化、局所的・過渡的熱擾乱に起因するクエンチの実験結果をそれぞれ Table 1 と Table 2 に示す。実験条件を温度 30 K (CX1, CX2 で測定)、検出電圧 100 mV、遅延時間 0.1 s、減衰時定数 1 s とした。

Table 1 で示す局所的劣化に起因するクエンチ実験について、劣化の度合いにより、クエンチが発生する電流値が異なるが、上記の保護条件では、「クエンチ発生時保護できる電流値」が存在することがわかる。Table 2 に示す局所的・過渡的熱擾乱に起因するクエンチ実験結果では、上記保護条件での保護できる最大通電電流が 150 – 160 A である。Table 1 での保護できる電流値の傾向と Table 2 での保護できる電流値と一致するため、「クエンチ発生時保護できる電流値」はクエンチの原因に依存しないと推測される。

また、番号 3 と番号 4 の実験では、磁場を下げることで臨界電流が変わったが、保護できる電流値が変わらなかったため、「クエンチ発生時保護できる電流値」は臨界電流値と関係ないと考えられる。

謝辞

本研究は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」の支援によるものである。

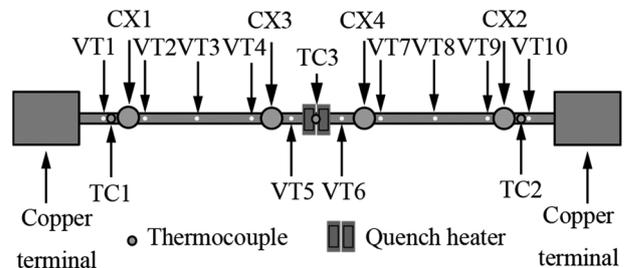


Fig. 1 Sample layout

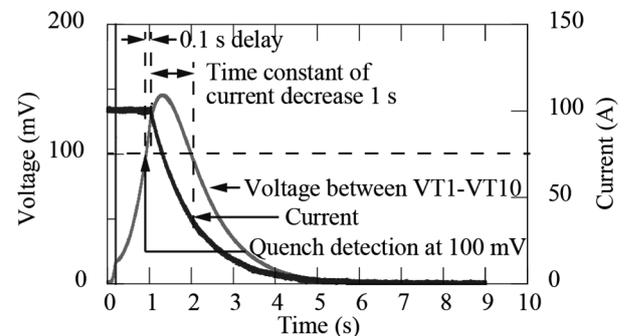


Fig. 2 An example of experiment results

Table 1. Quench induced by local degradation

No.	B	I_c between VT5-VT6	Currents where quench occur	Result
1	2 T	~ 50 A	115 A	Protected
	0.5 T	~ 110 A	180 A	Burnt out
2	2 T	~ 200 A	230 A	Burnt out

Table 2. Quench induced by transient and localized thermal disturbances

No.	B	I_c between VT1-VT10	Transition current	Result
3	2 T	~ 230 A	150 A	Protected
			160 A	Degraded
4	1 T	~ 280 A	150 A	Protected
			160 A	Degraded