

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 4月19日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22360116

研究課題名（和文） 次世代 REBCO 超伝導線材における交流損失の温度スケーリング則に関する研究

研究課題名（英文） Study on the scaling law with temperature of the ac losses in next generation REBCO superconducting wires

研究代表者

岩熊 成卓 (IWAKUMA MASATAKA)

九州大学・システム情報科学研究院・教授

研究者番号：30176531

研究成果の概要(和文):次世代超伝導線材として開発が進められている $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (RE:Rare Earth, Y, Gd など、REBCO) 超伝導線材の磁化・交流損失を鞍型ピックアップコイルを用いて、4.2K から 77K の温度領域に亘って測定し、REBCO 超伝導線材の臨界電流、磁化、交流損失が温度に関してスケーリングすることを明らかにし、任意の温度における REBCO 超伝導線材の交流損失特性を予測可能にした。

研究成果の概要(英文): By observing the magnetizations and ac losses of $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (RE:Rare Earth, Y, Gd and so on, REBCO) superconducting tapes at 4.2 K to 77 K, which are developed as next generation superconducting wires, with a saddle-shaped pick-up coil, it was shown that the critical currents, magnetizations and ac losses of REBCO superconducting tapes are scaled with temperature. That brings us the predictability of the ac loss properties of REBCO superconducting tapes at any temperature.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	6,600,000	1,980,000	8,580,000
2011年度	5,200,000	1,560,000	6,760,000
2012年度	2,700,000	810,000	3,510,000
総計	14,500,000	4,350,000	18,850,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学、電子・電気材料工学

キーワード：超伝導材料・素子、REBCO、交流損失、電気機器工学、電気・電子材料

1. 研究開始当初の背景

(1) $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (RE:Rare Earth, Y, Gd など、以後 REBCO) 超伝導線材は、次世代の超伝導線材として世界中で熾烈な開発競争が繰り広げられている。日米では、これを用いたケーブル、変圧器、SMES 等電力機器の開発が国プロとして開始された。

(2) REBCO 超伝導線材は、超伝導結晶自体が

ペロブスカイト構造を持ち、超伝導特性が大きな異方性を持つ。これに伴い、REBCO 線材の臨界電流 I_c は磁界印加角度依存性を持つ。

(3) REBCO 線材の交流損失は中心到達磁界 B_p (交流損失特性のグラフにおける折れ曲がり点) 以上の振幅に対しては基本的に I_c に比例するため、 I_c が磁界印加方向に依存しない条件下では磁界印加方向への投影幅にほぼ

比例し、 B_p 以上の磁界振幅では、線材面からの磁界印加角度を θ として垂直磁界中の交流損失に $\sin\theta$ をかけたものに一致する。

(4) 実際の交流損失は、(2)と(3)の両方の影響が混在した結果となり、さらに I_c の温度依存性があるため、交流損失を予測するには、まず I_c の温度、磁界、磁界印加角度を把握し、さらに、大きなアスペクト比による反磁界効果の影響(B_p 以下で超伝導スラブに対する理論値とは全く異なる)まで加味しなければならず、理論的に交流損失を予測することは難しかった。

(5) 超伝導機器における総熱負荷の大半は、垂直磁界により誘起されるREBCO線材の交流損失が占める。この交流損失の低減が超伝導機器開発の喫緊の課題であったが、筆者らはすでにこの問題解決のための手法を考案し、多層コイルでの検証も終了した。国際特許、さらに周辺特許を申請した。

(6) 超伝導機器が使用される温度領域が従来の低温超伝導線材と比べて極めて広く、交流損失の温度依存性まで含めると、その設計のための見積りには膨大な時間と煩雑な手順を要した。

(7) このような状況にあって、超伝導機器設計のためには超伝導巻線における交流損失の簡便な見積手法の確立が急務であった。研究代表者らは、すでに垂直磁界中におけるREBCO超伝導線材の I_c 、磁化および交流損失が温度に関してスケールリングすることを見出していた。

2. 研究の目的

本研究は、研究代表者らがすでに明らかにしたREBCO超伝導線材の垂直磁界中での交流損失についての温度スケールリング則を任意の磁界印加角度に拡張することによって、REBCO超伝導線材の広い温度、磁界・磁界印加角度領域における交流損失を簡便に予測する方法を確立することを目的とした。

3. 研究の方法

次の手順でREBCO超伝導線材の交流損失の温度スケールリング則を用いた交流損失予測手法の確立を目指した。

- 1) 各種REBCO超伝導線材の磁化および交流損失の温度、磁界振幅、磁界印加角度依存性を測定。
- 2) 測定した磁化より I_c の温度・磁界依存性を算出。
- 3) ピンニング理論を用いて I_c の温度・磁界・磁界印加角度依存性の解析とモデル化を

図り、磁界印加角度ごとに I_c の温度スケールリング則の成立性を確認。

- 4) 各磁界印加角度における I_c の温度スケールリング則を統一的な理論表式で記述し、磁化および交流損失の任意の磁界印加角度に対する温度スケールリング則に展開。
- 5) 導出した温度スケールリング則を用いて、任意の温度、磁界印加角度における予測値と実測値の比較を行い、妥当性を検証。

本研究では、研究代表者らが精密な理論計算の上で設計手法を確立し、現在、酸化物超伝導テープ線材の交流損失測定法の世界標準としても準備が進められている図1に示す鞍型ピックアップコイルを用いて、REBCO線材の磁化および交流損失の測定を行った。この鞍型ピックアップコイルは、試料テープの積層枚数、磁界に対する方向(磁界印加角度)、寸法に関わらず、較正なしに磁化および交流損失が測定できるように設計されている。実際の鞍型ピックアップコイルの写真を図2に示している。ピックアップコイル群のボビン是非磁性、非導電性であり、かつ熱伝導率が高いAINで作製している。これをクライオスタットの底に取り付けられたGM冷凍機により伝導冷却することによって試料温度を変えた。磁界印加角度は図1に示すように試料テープを軸の周りに回転させることによって変え、磁界は液体ヘリウム冷却の超伝導マグネットによって印加した。

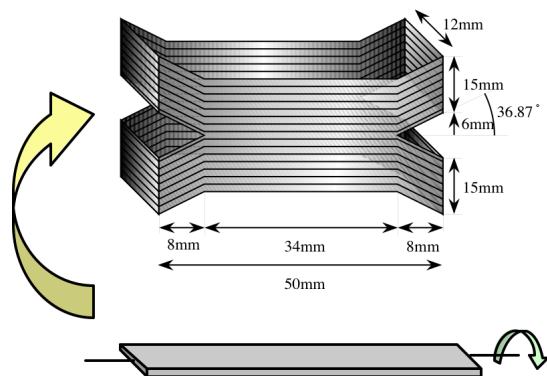


図1 測定に用いた鞍型ピックアップコイル

試料線材は、IBAD-PLD法線材(ハステロイテープ上にIon-Beam Assited Deposition法により $Gd_3Zr_3O_7$ もしくはMgO中間層を形成し、その上にPulsed Laser Deposition法によりさらに中間層である CeO_2 層とREBCO超伝導層を作製した線材)であり、研究協力関係

にある線材メーカーおよび研究機関よりご提供いただいた。

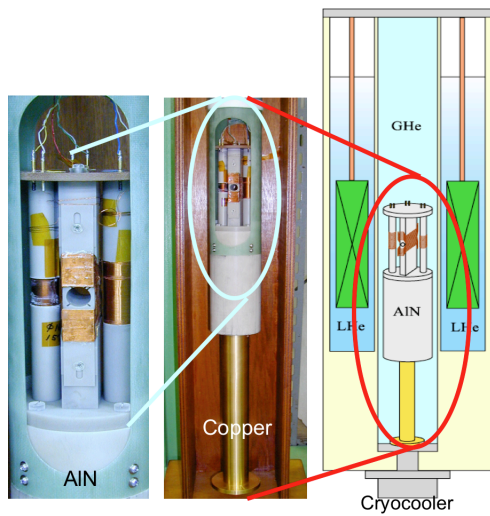


図2 鞍型ピックアップコイルおよびサンプルホルダー全体の写真とクライオスタット断面

4. 研究成果

一例として、10mm 幅の YBCO 線材を試料としてスケーリング則の成立性を調べた結果を示す。

図3は温度 64K において測定した磁化曲線である。ここでは磁界印加角度をパラメータとして示している。また、図4には、磁界印加角度を線材面に対し 45° として、温度 T をパラメータとした磁化曲線の測定結果を示している。このような磁化曲線の測定結果を用いて、まず、図5に示すような臨界電流 I_c の磁界 B 依存性を各温度について求め、これから図6に示すようなゼロ磁場における臨界電流 I_{c0} の温度 T 依存性を求めた。 I_{c0} は 4.2K から 77K まで磁界印加角度が異なっても一致した。この $I_{c0}(T)$ を用いて図5に示すような各温度における $I_c(B)$ 曲線を規格化すると、温度に関係なく $I_c(B)$ 曲線は図7に示すように1本のマスターカーブに一致した。また、図4の磁化曲線も $I_{c0}(T)$ を用いて規格化すると、図8に示すように温度に依らず、1つのマスター磁化曲線に一致した。すなわち、臨界電流 I_c 、磁化曲線は磁界印加角度に依らず、温度でスケーリングされることがわかった。

交流損失も磁化曲線と同様に鞍型ピックアップコイルを用いて測定した。図9、図10、図11に $T=77K$ 、64K、4.2K における交流損失の磁界振幅依存性の測定結果を示す。交流損失は磁化曲線が囲む面積であるから、磁化曲線が温度でスケーリングされれば、当然の帰結として交流損失も温度でスケーリングされるはずである。交流損失カーブについても $I_{c0}(T)$ を用いて規格化すると、図12に示すように磁界印加角度 90° 、 60° 、 45° 、

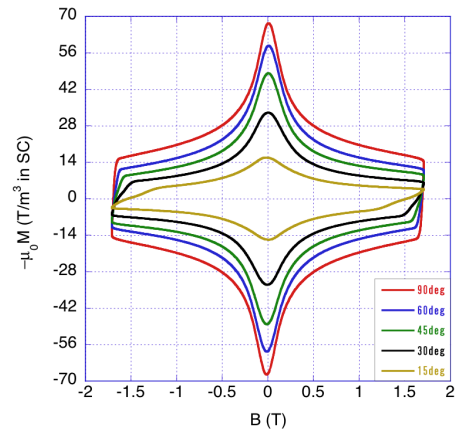


図3 64K において磁界印加角度をパラメータとし測定した YBCO 線材の磁化曲線

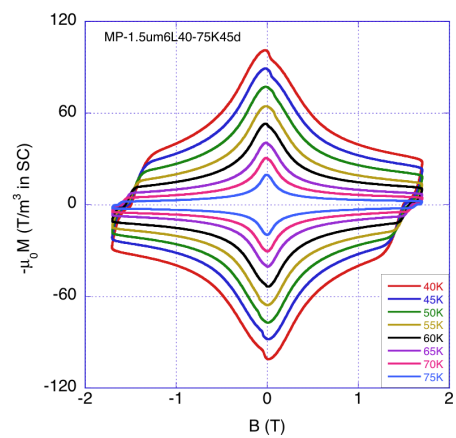


図4 磁界印加角度を 45° とし、温度をパラメータとして測定した YBCO 線材の磁化曲線

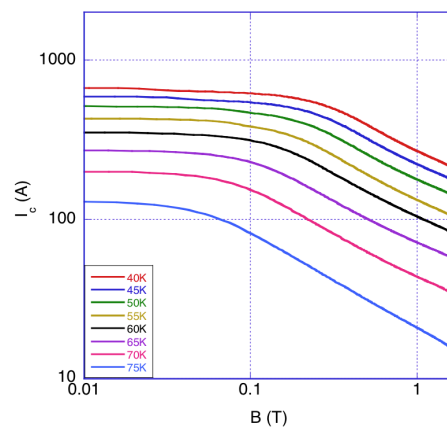


図5 磁化曲線より求めた臨界電流 I_c の磁界 B 依存性

30° 、 15° ごとに温度に関わらず1本のマスターカーブに一致し、スケーリングされることが示された。

これにより、自己磁界（ゼロ磁場）の I_c の温度依存性と、ある温度における交流損失

カーブ 1 本を測定すれば、任意の温度における交流損失が予測可能になったのである。図 1 3 は、77K における垂直磁界中の交流損失の測定値から、4.2K、35K、45k、64K における垂直磁界中の交流損失を予測し、実測値と比較したものである。よく一致している。

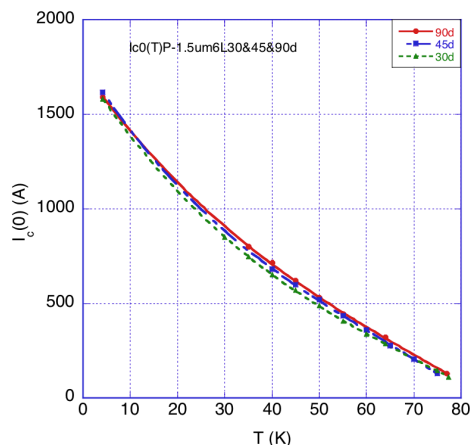


図 6 磁界印加角度をパラメータとした I_{c0} の温度依存性

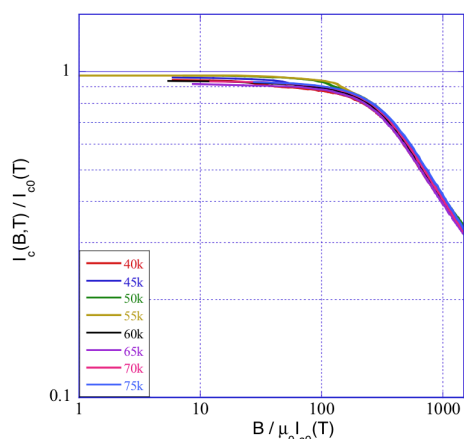


図 7 I_{c0} を用いて規格化した $I_c(B)$ 特性

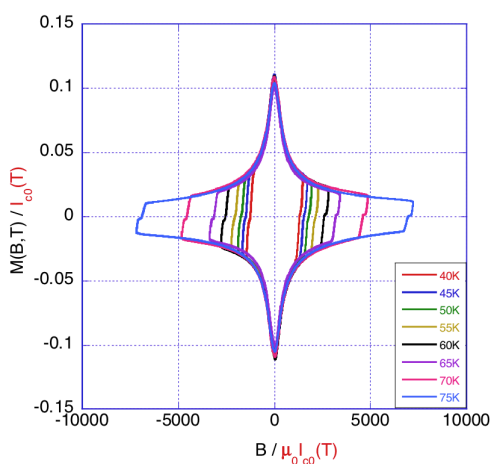


図 8 I_{c0} を用いて規格化した磁界印加角度 45° の磁化曲線

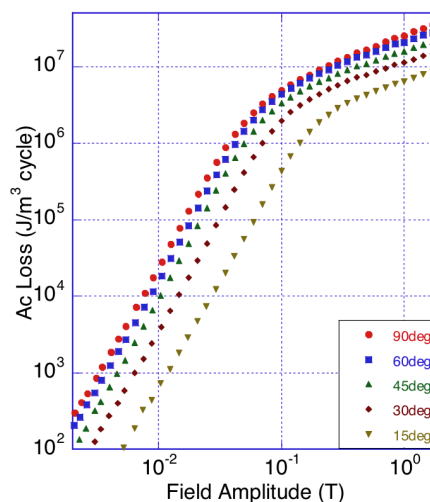


図 9 77K における交流損失の磁界印加角度をパラメータとした磁界振幅依存性

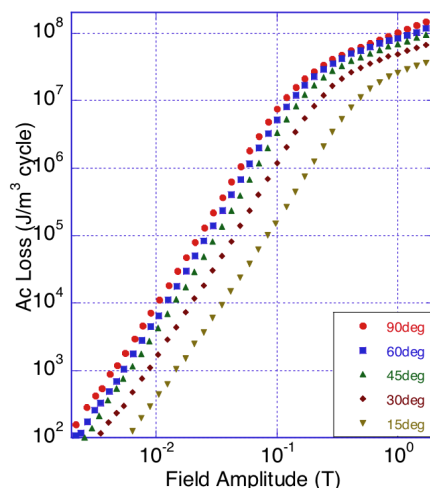


図 10 64K における交流損失の磁界印加角度をパラメータとした磁界振幅依存性

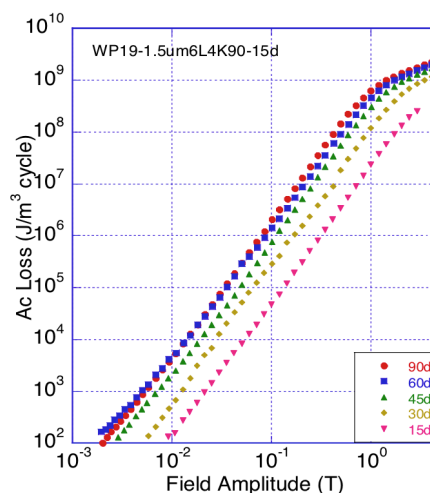


図 11 4.2K における交流損失の磁界印加角度をパラメータとした磁界振幅依存性

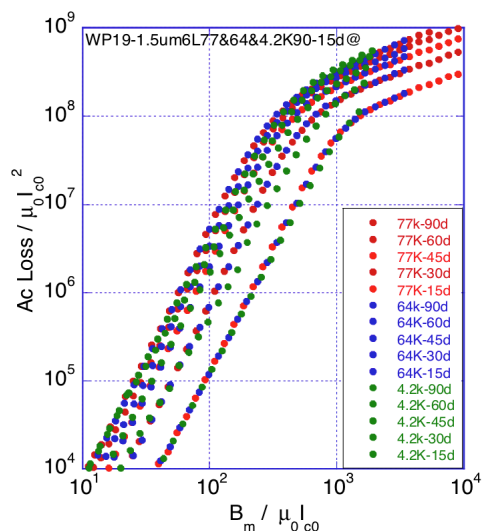


図 1 2 I_{c0} を用いて規格化した交流損失の磁界振幅依存性 (パラメータは磁界印加角度)

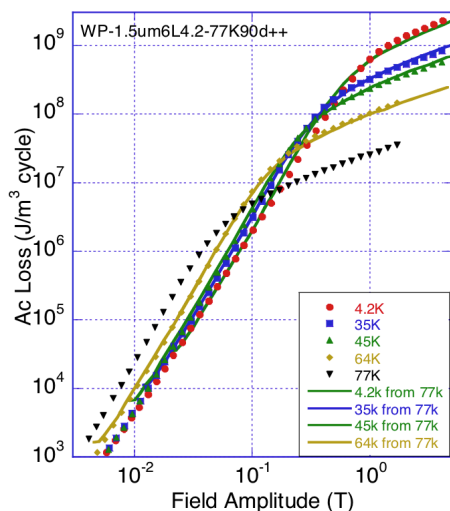


図 1 3 4.2K、35K、45K、64K における垂直磁界中の交流損失を、77K における測定値からスケーリング則を用いて予測した値 (実線) と実測値の比較

さらに、任意の磁界印加角度についてスケーリング則が成立することから、77K 垂直磁界中で交流損失を測定し、これを用いて任意の温度における任意の磁界印加角度の交流損失が予測可能かどうかを調べた。図 1 4 は、77K における垂直磁界中の交流損失を測定し、これを用いてまず 64K 垂直磁界中の交流損失を予測した。次に、これから 64K における磁界印加角度 45° 、 30° の場合の交流損失を予測した。予測には導出した予測式を用いた。予測値は実測値とよく一致し、当初の目的が達成できたことを検証した。

本研究では、REBCO 超伝導線材の臨界電流、磁化、交流損失が温度に関してスケーリ

ングされることを世界に先駆けて明らかにするとともに、ある温度、具体的には液体窒素温度 77K における垂直磁界中の交流損失の測定値から、任意の温度、磁界印加角度の交流損失を予測する手法を明示した。これにより、REBCO 超伝導線材を用いた電気機器巻線の設計を簡略に行えるようになった。

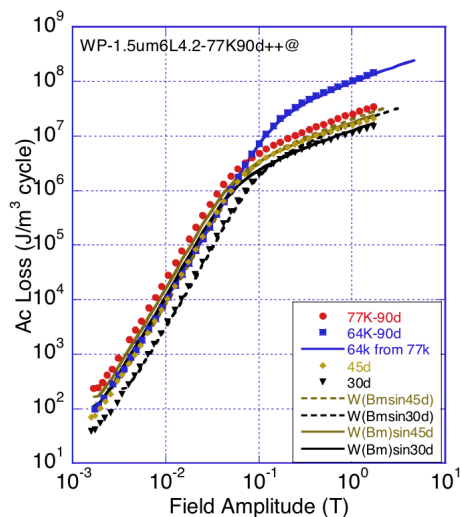


図 1 4 77K 垂直磁界中における交流損失の測定値からスケーリング則を用いて予測した 64K における垂直磁界中の交流損失 (青実線)、さらにこれから磁界印加角度 45° 、 30° における交流損失を予測したもの (薄茶、黒実線、破線) と実測値との比較

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 2 件)

- ① M. Iwakuma, Y. Katanosaka, S. Sato, H. Hayashi, H. Okamoto, Y. Goshō, A. Tomioka, M. Konno, Y. Iijima, T. Saitoh, T. Ohkuma, A. Tagomori, T. Izumi, Y. Shiohara, Development of REBCO superconducting transformers with a current limiting function, IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 23, Article No. 6376116, 2013, DOI: 10.1109/TASC.2012.2232345 査読有
- ② M. Iwakuma, T. Ogata, S. Tomoda, T. Kisu, Y. Yoshida, A. Ishiyama, Y. Yamada, T. Izumi and Y. Shiohara, Feasibility Study on a 400 kW-3600 rpm REBCO Fully Superconducting Motor, IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 22, No. 3, 2012, Article No. 5201204, DOI: 10.1109/TASC.2011.2177229 査読有

- ③ Tomoaki Tsutsumi, Akira Tomioka, Masataka Iwakuma, Hiroshi Okamoto, Yoshihiro Goshō, Hidemi Hayashi, Yasuhiro Iijima, Takashi Saito, Takeshi Ohkuma, Akihiko Tagomori, Teruo Izumi, Yuh Shiohara, Development of REBCO Superconducting Transformers with Current Limiting Function, Physics Procedia, Vol. 36, pp. 1115–1120, 2012, DOI: 10.1016/j.phpro.2012.06.186 査読有
- ④ Keisuke Kumano, Daisuke Moriwaki, Masataka Iwakuma, Kazuo Funaki, Hidemi Hayashi, Hiroshi Okamoto, Yoshihiro Goshō, Takeshi Ohkuma, Akihiko Tagomori, Teruo Izumi, Yuh Shiohara, Theoretical Study on AC Loss Properties of REBCO Superconducting Two-Strand Parallel Conductors Exposed to a Non-Uniform Magnetic Field, Physics Procedia, Vol. 36, pp. 1109–1114, 2012, DOI: 10.1016/j.phpro.2012.06.185 査読有
- ⑤ Takuya Hayashi, Sosuke Nakamura, Masataka Iwakuma, Kazuo Funaki, Akira Ibi, Yutaka Yamada, Teruo Izumi, Yuh Shiohara, Takashi Saitoh, Yasuhiro Iijima, AC Loss Properties of Laser-Scribed Multi-Filamentary GdBCO Coated Conductors with Artificial Pinning Centres, Physics Procedia, Vol. 36, pp. 1522–1527, 2012, DOI: 10.1016/j.phpro.2012.06.204 査読有
- ⑥ M. Iwakuma, Development of a REBCO superconducting transformer with current limiting function, IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 21, pp.1405-1408, 2011, DOI: 10.1109/TASC.2010.2089592 査読有
- ⑦ S. Yamasaki, M. Iwakuma, 他 9 名, Transport and AC loss properties of the repaired multifilamentary REBCO superconducting tapes, Physica C, Vol. 470, pp.1316-1320, 2010, 査読有

[学会発表] (計 2 4 件)

- ① 岩熊成卓、限流機能を有する高温超伝導変圧器の開発、応用物理学会超伝導分科会 第 46 回研究会、2012 年 12 月 6 日、東京
- ② M. Iwakuma, Y. Katanosaka, S. Sato, H. Hayashi, H. Okamoto, Y. Goshō, A. Tomioka, M. Konno, S. Yoshida, Y. Suzuki, A. Tagomori, T. Ohkuma, M. Yoshizumi, T. Izumi, Y. Shiohara, Development of a 66kV-20MVA REBCO Superconducting Transformer with a Current Limiting Function, International Conference on

Coated Conductors for Applications 2012, Nov. 11-14, 2012, Heidelberg, Germany

- ③ 福田幸弘、片野坂祐太、川鍋良平、岩熊成卓、岡元洋、林秀美、五所嘉宏、富岡章、田子森秋彦、大熊武、和泉輝郎、塩原融、Y 系超伝導変圧器の交流損失特性の評価、第 86 回低温工学・超電導学会、2012 年 11 月 7-9 日、盛岡
- ④ 坂川涼、熊野圭恭、岩熊成卓、船木和夫、岡元洋、林秀美、五所嘉宏、田子森秋彦、大熊武、和泉輝郎、塩原融、2 層にわたる超伝導 2 本転位並列導体の交流損失特性、第 86 回低温工学・超電導学会、2012 年 11 月-9 日、盛岡
- ⑤ 岩熊成卓、ピックアップコイルによる超伝導線材・導体の磁化・交流損失測定、2012 年度低温工学・超電導学会九州・西日本支部若手セミナー、2012 年 9 月 17-19 日、大分県九重
- ⑥ M. Iwakuma, Development of HTS power devices, Kyushu University & Changwon National University Joint Workshop 2012 on Superconductivity, Jan. 6, 2012, Fukuoka
- ⑦ 岩熊成卓、REBCO 超伝導線材・導体の磁化と交流損失の低減、低温工学・超電導学会 2011 年度東北・北海道支部/材料研究会合同研究会、2011 年 9 月 29 日、日光市
- ⑧ 岩熊成卓、超伝導線材の交流損失低減技術の過去・現在・未来、超電導技術動向報告会、2011 年 5 月 23 日、東京

6. 研究組織

(1)研究代表者

岩熊 成卓 (IWAKUMA MASATAKA)
九州大学・大学院システム情報科学研究
院・教授
研究者番号：3 0 1 7 6 5 3 1