

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2007～2010

課題番号：19360124

研究課題名(和文) 大型超伝導導体の素線配置分布に基づく不規則結合損失の定量的解明

研究課題名(英文) Investigation of irregular coupling loss based on strand arrangement in large superconductor

研究代表者

濱島 高太郎 (HAMAJIMA TAKATARO)

東北大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：00314815

研究成果の概要(和文)：

大型超伝導機器に用いられるケーブル・イン・コンジット導体内の多数本の超伝導素線の3次元計測装置を開発し、多数本の素線位置を世界で初めて測定するのに成功した。この結果、各素線が初期に予想されていた位置から大きく変位するものが現れ、本来の素線間の接触位置がずれることになって、ループの形が不規則となり、外部磁界と不規則に鎖交することが明確になった。コイルに加わる変動磁界による不規則な鎖交磁束が不規則な結合損失を定量的に計算することができた。さらに、計算力学モデルを構築して、各素線の3次元位置推定が初めて可能になった。

研究成果の概要(英文)：

Many strand locations in Cable-in-Conduit conductor were successfully measured, by using a developed 3 dimensional measurement instrument. Measured data shows that many strands are deviated from the expected positions after the conductor fabrication, and hence contacting points forming loops are also deformed from the expected positions and magnetic flux linked with the loops are irregular. Changing magnetic fields generated by a coil cause the irregular coupling losses in such deformed loops, and the loss was quantitatively analyzed. After formulating an algorithm of strand mechanics, 3 dimensional strand locations in the conductor were estimated.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	6,900,000	2,070,000	8,970,000
2008年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2009年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2010年度	2,200,000	660,000	2,860,000
年度			
総計	14,100,000	4,230,000	18,330,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：電気エネルギー工学(発生・変換・貯蔵・省エネルギーなど)、超伝導機器

1. 研究開始当初の背景

大型超伝導機器に用いられる超伝導導体は直径1mm程度の細い超伝導素線を多数本撚り合わせた後ステンレス管に収納してケ

ーブル・イン・コンジット(CIC)と呼ばれる強大な電磁力に耐える構造を持つ。このCIC導体で製作した超伝導コイルは変動磁界を受けると交流損失が発生し、予測可能な

短い時定数と、コイル状にして初めて現れる長い時定数の損失が発生する。この長い時定数は超伝導コイルの運転が不可能となる危険性があったので、この原因を明らかにする。

2. 研究の目的

次のことを研究の目的とする。

- (1) 多数本のケーブルがコンジット内で約60%の占有率になるまで圧縮されるために、素線が不規則に変位するので、導体内の各素線の位置を3次元的に計測する方法を開発して、撚りピッチなどの導体製作パラメータと比較する。
- (2) 素線が圧縮時に受ける変形は確率論に基づくので、その模擬方法として、線形解析位置からの摂動として表現できる動力学に基づいた計算力学モデルを新しく提案し、3次元計測結果で得られた変位分布と比較検討する。
- (3) 不規則鎖交磁束を計算するには、コイルに加わる変動外部磁界はコイルの3次元的位置で異なるので、磁界解析プログラムと連成して不規則な鎖交磁束を正確に迅速に計算して不規則結合損失をシミュレーションして、高性能なCIC導体構成を提案する。
- (4) 時定数の基礎量となる接触抵抗は各素線の表面状態や接触圧力などに大きく依存するので、使用する各種の素線間の接触長と接触抵抗の関係を測定する。

3. 研究の方法

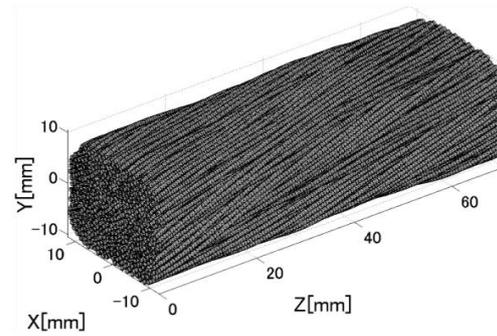
以下の方法で研究の目的を達成する。

- (1) 多数本の素線で構成されたCIC導体を10mm程度の長さ毎に各断面の素線位置を測定し、導体長手方向に関数近似で連続的に表示する。素線数がきわめて多いので、自動計測システムを開発する。
- (2) 素線の推定には、各素線の占有する面積と、各次数のケーブルの面積をツイストピッチの関数として計算して、素線位置を求める。次に、計算力学モデルとして、素線間の距離の関数としてバネ定数を採用し、導体全体の機械エネルギーを最小化する。
- (3) 各素線間で構成されるループに鎖交するコイルからの外部磁界の解析を行い、不規則な交流損失をそれぞれ解析する。
- (4) 素線位置の推定には、導体の特性を決定する指標が重要であり、ここでは、素線間の接触長を指標として、その分布を調べる。

4. 研究成果

以下に得られた成果を示す。

- (1) 素線位置の自動計測装置を開発し、実際に適用した結果、導体内の各素線の3次元配置を世界で初めてビジュアル化できた。その1例として、直径0.8mmの486本の超伝導素線数からできた導体内の各素線の



配置図を上図に示す。

- (2) 導体内の各ケーブル内の面積を同じに回転する棟面積法を用いて素線の位置を推定できた。その推定を更に高度化するための計算力学モデルを構築して、計算することが可能となった。
- (3) 素線間で構成されるループに鎖交する磁束を解析し、不規則結合損失を解析し、時定数の長い成分があることが分かった。その損失を定量的に解析した結果、実験結果と比較的良く一致した。
- (4) 導体内の素線位置を推定できると、製作する前に多くの特性の評価が可能となるので、その評価のための指標として、素線間の接触長や接触長さを測定値と比較した結果、良く一致し、計算力学モデルの妥当性が得られた。

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6件)

1. T. Hamajima, S. Teshima, Y. Shibata, T. Yagai, M. Tsuda, K. Takahata, S. Imagawa and T. Mito, "Conceptual Design of Coaxial Multi-Layer Type CIC for SC Magnet of FFHR", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 査読有, Vol.20, NO.3, 560-563, 2010
2. Tsuyoshi Yagai, Yasuyuki Shibata, Jun Ohmura, Makoto Tsuda, Takataro Hamajima, Yoshihiko Nunoya, Kiyoshi Okuno, Kazuva Takahata, "Flux linkage areas of coupling current loops for different shape cable-in-conduit conductor", Cryogenics, 査読有, Vol.50, (2010) 200-203
3. 濱島高太郎, 津田理, 谷貝剛, 高畑一也, 今川信作, 「同軸多層 Cable-in-Conduit 導体内の電流分布を考慮した基本設計」, 電気学会論文誌 B, 査読有, 129 巻, 11 号, pp.1299-1304, 2009
4. T. Yagai, Y. Shibata, J. Ohmura, M. Tsuda, T. Hamajima, Y. Nunoya, K.

- Okuno, K. Takahata, "Irregular Flux Linkage for Coupling Current Loops in Different Type CIC Conductors", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 査読有, Vol.19, NO.2, 2387 – 2390, 2009
5. T. Yagai, Y. Nara, J. Ohmura, M. Tsuda, T. Hamajima, Y. Nunoya, K. Okuno and K. Takahata, "Investigation of a Mechanism Forming Irregular Loops in Large CIC Conductor," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 査読有, Vol.18, No.2, 1123-1126, 2008
 6. T. Yagai, H. Sato, Y. Nara, M. Tsuda, T. Hamajima, Y. Nunoya, K. Okuno and K. Takahata, "Investigation of Irregular Strand Positions Causing Additional AC Losses in CIC Conductor," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 査読有, Vol.17, No.2, 2470-2473, 2007
- [学会発表] (計 19 件)
1. S. Teshima, S. Nakazawa, M. Tsuda, T. Hamajima, T. Yagai, Y. Nunoya, K. Okuno, K. Takahata, "Analysis of Strand Positions in CIC Conductor", SAP-44, 23rd International Symposium on Superconductivity, 2010年11月1日, エポカルつくば
 2. T. Hamajima, "Coaxial Multi-Layer CIC Conductor for Large-Scale Superconducting Magnet", JSPS-CAS Core-University Program Seminar on Superconducting Key Technology for Advanced Fusion Device, 2010年10月18日, Xi'an, China,
 3. 中澤忍, 手島翔太郎, 津田理, 濱島高太郎, 谷貝剛, 高畑一也 : 「超電導 CIC 導体のジョイント部の素線配置に関する考察」, 電気関係学会東北支部平成 22 年度連合大会, 2J07, p310, 平成 22 年 8 月 27 日, 八戸工業大学
 4. 手島翔太郎, 中澤忍, 津田理, 濱島高太郎, 谷貝剛, 布谷嘉彦, 奥野清, 高畑一也 : 「大型超電導 CIC 導体内の素線配置による臨界電流特性の検討」, 電気学会超電導応用電力機器研究会, ASC-10-020, pp19-24, 2010年6月10日, 九州電力
 5. 谷貝剛, 中澤忍, 手島翔太郎, 柴田健志, 津田理, 濱島高太郎, 布谷嘉彦, 奥野清, 高畑一也 : 「大型超伝導ケーブル・イン・コンジット導体の撚り乱れと臨界電流特性の相関」平成 22 年電気学会全国大会, 5-118, 2010年3月19日, 明治大学
 6. 谷貝剛, 手島翔太郎, 柴田健志, 津田理, 濱島高太郎, 布谷嘉彦, 奥野清, 高畑一也 : 「大型 CIC 導体の素線軌跡計測による素線間結合損失に関する検討」, 電気学会超電導応用電力機器研究会, ASC-10-013, pp. 57-62, 2010年1月26日, 名古屋大学
 7. 濱島高太郎, 谷貝剛, 津田理, 高畑一也, 今川信作 : 「核融合用大型同軸多層型ケーブル・イン・コンジット導体の検討」, 第 81 回秋季低温工学・超電導学会講演概要集, p53, 2009年11月18日, 岡山大学
 8. T. Yagai, S. Teshima, Y. Shibata, M. Tsuda, T. Hamajima, Y. Nunoya, K. Okuno, K. Takahata, "Investigation of the Effect of Twist Pitches and Strand Displacement on Forming Coupling Current Loops in Large Scale CIC Conductor", The 21th International conference on Magnet Technology, 4BP-07, 中国, 合肥, 2009年10月22日
 9. T. Hamajima, S. Teshima, Y. Shibata, T. Yagai, M. Tsuda, K. Takahata, S. Imagawa, T. Mito, "Conceptual Design of Coaxial Multi-Layer Type CIC for SC Magnet of FFHR", The 21th International conference on Magnet Technology, 4BP-24, 中国, 合肥, 2009年10月22日
 10. 手島翔太郎, 柴田健志, 谷貝剛, 津田理, 濱島高太郎, 高畑一也, 今川信作, 三戸利行 : 「同軸多層型 CIC 導体の電流分布と超電導素線配置依存性」, 電気学会超電導応用電力機器研究会, ASC-09-22, pp11-15, 2009年6月11日, 京都大学
 11. 手島翔太郎, 柴田健志, 谷貝剛, 津田理, 濱島高太郎, 高畑一也, 今川信作, 三戸利行 : 「同軸多層型 CIC 導体の電流分布特性」, 第 80 回春季低温工学・超電導学会講演概要集, p212, 2009年5月15日, 早稲田大学
 12. 谷貝剛, 柴田健志, 大村惇, 津田理, 濱島高太郎, 布谷嘉彦, 奥野清, 高畑一也 : 「大型 CIC 導体の撚りピッチと交流損失」平成 21 年電気学会全国大会, 5-139, p215, 2009年3月17日, 北海道大学
 13. 柴田健志, 手島翔太郎, 大村惇, 谷貝剛, 津田理, 濱島高太郎, 布谷嘉彦, 奥野清, 高畑一也 : 「撚りピッチの異なる 2 種の CIC 導体における交流損失の測定結果」電気学会超電導応用電力機器研究会, ASC-09-4, pp. 13-16, 2009年1月19日, 成蹊大学
 14. 柴田健志, 奈良雄樹, 大村惇, 谷貝剛, 津田理, 濱島高太郎, 布谷嘉彦, 奥野清, 高畑一也 : 「大型 CIC 導体内に発生する結合損失の形状特性に関する考察」平成 20 年電気学会電力・エネルギー部門大会, pp.85-86, 2008年9月24日, 広島大学
 15. T. Yagai, Y. Shibata, J. Ohmura, M.

- Tsuda, T. Hamajima, Y. Nunoya, K. Okuno, K. Takahata, "Irregular Flux Linkage for Coupling Current Loops in Different Type CIC Conductors", Applied Superconductivity Conference, 米国, シカゴ, 2008年8月19日
16. 大村惇, 柴田健志, 奈良雄樹, 谷貝剛, 津田理, 濱島高太郎, 布谷嘉彦, 奥野清, 高畑一也:「大型ケーブル・イン・コンジット導体の結合損失の形状依存性」, 超電導応用電力機器研究会, ASC-08-21, pp. 13-18, 2008年6月12日, 琉球大学
17. 谷貝剛, 柴田健志, 木村惇, 津田理, 濱島高太郎, 布谷嘉彦, 奥野清, 高畑一也:「異なる断面形状のCIC導体における結合電流ループの実効的鎖交面積の考察」, 第78回春季低温工学・超電導学会講演概要集, p195, 2008年5月26日, 明星大学
18. 奈良雄樹, 木村惇, 谷貝剛, 津田理, 濱島高太郎, 布谷嘉彦, 奥野清, 高畑一也:「素線数の異なる大型超電導CIC導体の素線軌跡の比較研究」, 第77回秋季低温工学・超電導学会講演概要集, p134, 2007年11月21日, 仙台市
19. 谷貝剛, 大村惇, 奈良雄樹, 津田理, 濱島高太郎, 布谷嘉彦, 奥野清, 高畑一也:「大型CIC導体に電磁力模擬圧縮力を印加したときの素線配置変位の検討」平成19年電気学会電力・エネルギー部門大会, 209, pp. 7-8, 2007年9月12日, 八戸工業大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

濱島 高太郎 (HAMAJIMA TAKATARO)
東北大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：00314815

(2) 研究分担者

津田 理 (TSUDA MAKOTO)
東北大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：10267411

研究分担者

谷貝 剛 (YAGAI TSUYOSHI)
上智大学・理工学部・准教授
研究者番号：60361127

(3) 連携研究者

布谷 嘉彦 (NUNOYA YOSHIHIKO)
日本原子力開発機構・核融合研究開発部門・副主任研究員
研究者番号：30354632

連携研究者

高畑 一也 (TAKAHATA KAZUYA)
核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・教授