

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

研究代表者の専門分野：工学

科研費の分科・細目：電力工学・電気機器工学

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)

### 1. 研究計画の概要

大型超電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、予測可能な時定数の短いと、コイル状にし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るので、これを解明することを目的とする。そのために、次のことを目標とする。(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。以上を通して不規則交流損失を解明する。

### 2. 研究の進捗状況

多数本の素線で構成された CIC 導体の不規則交流損失を調べるために行った研究の進捗状況を以下に示す。まず、(1) 研究課題素線位置を正確に 3 次元表示できる測定装置と自動計測システムを開発した。その結果、試作した 81 本の素線数を有する円形 CIC 導体を約 10 mm ごとに切断して、測定し、それらの面での各素線位置を導体長手方向に内挿することにより、各素線の 3 次元配置を世界で初めて明瞭に示すことができた。測定した素線の 3 次元位置情報から、素線配置分布の統計学的推定のために、素線段階、1 次、2 次などの各撚線次数段階での素線の不規則変位分布が明確となり、それらに関する期待値や標準偏差などの統計的標本データを収集した。(2) CIC 導体内の各素線の初期分布として、各次数の撚線が占める面積が同じとして断面内に本来配置されるべき素線の中心位置分布を計算するアルゴリズムを開発して任意の本数や撚り段数でも素線位置を推定できる数値解析プログラムを確立した。しかし、実際には、素線同士が圧縮力による押し合いを受けて本来の位置から圧縮を受けて変形する。このため、各素線の機械的なポテンシャルエネルギーの総和が最小となる位置を求める計算力学モデルを構築した。(3) 不規則な交流損失は、素線間距離のループ内での積分値であるループの面積に対する投影面積に比例するので、ループ毎に計算される結合損失の全体の積分値を比較する。投影鎖交面積は X, Y の 2 方向で求めており、幅広面に垂直な方向を X と定義して、それぞれの方向に関する結合損失を求めた。矩形導体の結合損失は、81 素線 CIC 導体の結合損失

結果と比較すると、幅広面に垂直な方向の変動磁界に対して、損失が大きくなる可能性が始めて示唆された。これは、幅広面における素線軌跡が、矩形に圧縮される際に不規則な変化を受けやすいためと考えられる。(4)素線間の接触抵抗を4端子法で測定し、不規則交流損失の基礎データを習得した。

### 3. 現在までの達成度

②おおむね順調に進展している。

(理由)

本研究は、世界的に初めて素線配置を3次元的に明らかに示し、そのデータから得られる成果は国際ジャーナル誌や国際会議で発表し、世界的にも高い評価を受けて、順調に推移している。

### 4. 今後の研究の推進方策

これまでの研究で基礎的な部分は完成したので、以下に示すように、研究の高度化と技術の広範囲への適用と確立を行う。先ず、(1)3次元測定装置の広範囲な導体へ適用できるような変更と、その自動化の推進、(2)素線配置の推定の精度の向上と広範囲な導体への適用、(3)交流損失のシミュレーションの広範囲な導体への適用を進めて、素線数の多い他のCIC導体についても適用できるように技術を確立する。

### 5. 代表的な研究成果

(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5件)

1. T. Yagai, Y. Shibata, J. Ohmura, M. Tsuda, T. Hamajima, Y. Nunoya, K. Okuno, K. Takahata, "Flux linkage areas of coupling current loops for different shape cable-in-conduit conductor", *Cryogenics*, 査読有, 50巻, 2010, pp.200-203
2. 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, 2009, pp.1299-1304
3. 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, 2009, pp.2387-2390
4. 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, 2008, pp.1123-1126

5. 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, 2007, pp.2470-2473

[学会発表] (計15件)

1. 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, 2009年11月18日, 岡山大学
2. T. Yagai, S. Teshima, Y. Shibata, M. Tsuda, T. Hamajima, Y. Nunoya, K. Okuno and K. Takahata, "Investigation of the Effect of Twist Pitches and Strand Displacement on Forming Coupling Current Loops in Large Scale CIC Conductor", 21-th International Conference on Magnet Technology, 2009年10月20日, 合肥(中国)
3. 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, 2008年10月5日, 広島大学
4. 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, 2008年6月13日, 琉球大学
5. 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, 2007年11月21日, 宮城県民会館