

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 25 日現在

機関番号：31103

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360118

研究課題名(和文) 圧縮変形を考慮した大型ケーブルインコンジット超伝導体内の素線位置の最尤推定解析

研究課題名(英文) Maximum likelihood estimation of all strand positions in Cable-in-Conduit superconductor considering compressed deformation

研究代表者

濱島 高太郎 (HAMAJIMA, TAKATARO)

八戸工業大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：00314815

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,700,000円、(間接経費) 3,510,000円

研究成果の概要(和文)：大型超伝導コイルではケーブル・イン・コンジット導体を用いるが、高磁界下で運転すると予期しない超伝導特性の劣化が発生する場合がある。この原因は、各素線が初期に予想されていた位置から大きく変位して外部磁界と不規則に鎖交して発生することによる。この特性劣化を究明するために、導体の製造パラメータ(素線占有率、撚りピッチなど)と圧縮変形を考慮した等面積法と各素線の機械的エネルギーを最小化する方法で3次元素線配置を解析し、実際の素線位置測定結果と比較した。その結果、種々の統計的指標が一致したので、この解析方法を基に特性劣化の原因を究明し、その対策を提案した。

研究成果の概要(英文)：Large scale superconducting coil made of cable-in-conduit conductor causes deterioration on superconductivity characteristics when it is operated under high magnetic field. This stems from that each strand deviates from the expected original position and irregularly links with external magnetic field. In order to investigate the cause, three dimensional all strand locations in the conductor are analyzed by both equal area method and minimization method of mechanical strain energies of all strands with consideration of conductor parameters such as void fraction and twist pitches and compressed deformation, and then are compared with measured ones. Since the results show many analyzed statistical quantities are in good agreement with measured ones, this analysis makes clear the cause of deterioration.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学，電気機器工学

キーワード：電気エネルギー工学 超伝導機器

## 1. 研究開始当初の背景

将来の重要な電力エネルギー機器である超伝導電力貯蔵装置 (SMES) や核融合装置の心臓部になる超伝導コイルに用いられる大型超伝導導体は、直径 1mm 以下の細い超伝導素線を 3 本単位の多段撚り構成をしたケーブルを、ステンレスのコンジットの中に占有率 60% 程度で収納するケーブル・イン・コンジット (CIC) 構成が用いられる。空隙には冷媒を流して超伝導導体を冷却し、ステンレス管は強大な電磁力を支持する。

このような CIC 導体で製作した超伝導コイルには、次の 3 つの大きな課題があり、これらは、日本原子力研究開発機構、核融合科学研究所、米国、ヨーロッパなどの各国の国立研究機関でも観測されている。すなわち、(a) CIC 導体は変動磁界を受けると交流損失を発生し、その交流損失には損失時定数が数 10ms の短い時定数の他に、数 10 秒以上の超伝導コイルに製作して初めて現れる不規則な長時定数の成分が発生して超伝導コイルの運転ができなくなる場合がある。(b) 大型の超伝導コイルでは、直流通電時にある特定の素線に多くの電流が流れる偏流現象が発生し、その素線の電流が臨界電流を超えた場合に、電流が隣の素線へ転流できないとクエンチに至ることが懸念される。(c) 高磁界下の素線には、電流が流れると大きな電磁力が作用し、近くの素線と交差して機械的曲げ応力を受けて超伝導特性の劣化を惹起する場合がある。この主要な原因は、導体内の各素線位置を調べた結果、多数本の超伝導素線が導体製作時に圧縮を受けて所定の位置から大きく変位するために発生することが分かっていたので、それらを詳細に調べて上記の課題を明らかにする。

## 2. 研究の目的

実際に製作した数種類の CIC 導体を対象にケーブル内の素線を約 10 mm 間隔に切断して、その断面内で全数の位置を測定し、サンプル全長に渡って全素線の 3 次元配置を求める。しかし、コイルの導体長は数 100m と長いため、実際に測定することは不可能である。また、導体の製作する前の設計段階で全素線の位置を把握することは困難である。したがって、全長に渡る素線配置を妥当な解析方法で推定する必要があり、そのためには適切に素線配置を特徴づける統計的な指標を提案し、それらの指標を実導体の測定値と解析値で比較する。統計量には、素線配置の変形度合いを表す特性として、所定の位置からの変位、1 次サブケーブルの面積やツイストピッチの統計分布、などがある。また、交流損失特性に大きく関与する 2 本の素線対を構成するループ特性として、ループ長、ループ面積や接触長の分布がある。さらに、接続部における電流偏流現象に関係するケーブル表面に出現する素線の分布特性などがある。これらの統計的指標に関して実際の導体で

の素線位置の 3 次元測定結果と等面積法などによる解析推定結果を比較検討し、CIC 導体の課題を明らかにする。

## 3. 研究の方法

実際の CIC 導体として、大型ヘリカルコイル用導体 (LHD-0V 導体) 81 本円形 CIC 導体、国際核融合実験炉用導体 (ITER-CS 導体) を用いて導体内の 3 次元素線配置を測定する。そのデータから、上記の変形特性として、トリプレットの重心と各素線間や、各サブケーブルの重心と 1 次下のサブケーブルの重心の平均距離とその標準偏差、最大値、および、ヒストグラムを評価する。また、各サブケーブルの面積の平均値と標準偏差、長手方向分布を比較する。さらに、素線対のループ特性として、ループ長や素線間接触長さ、および、ループと外部磁界の鎖交面積、の平均値と標準偏差、最大値、ヒストグラムの統計量を評価する。また、ケーブル表面に出現する素線の長さ分布を評価する。

一方、CIC 導体内の素線位置を推定するために、実際の CIC 導体の撚線製造工程を考慮して、各次数の撚りケーブルの占有する面積が等しくなるように導体の断面から各撚りケーブルの重心とモーメントを求めて、最終的に素線の重心位置を求める等面積法で解析する。等面積法で解析した素線位置は周囲の素線と重なりが生じるので、実際の素線位置を推定するために、ケーブル内での素線間の機械的な接触歪エネルギーや曲げ歪エネルギーを評価関数として、素線位置に微小な摂動を加えて遺伝的アルゴリズムを適用し、素線位置の最尤推定を行い、全素線位置の最適な再分布を求める。

実際に計測した CIC 導体と同じ製造パラメータを用いて、等面積法と遺伝的アルゴリズム手法による素線配置の最尤推定値を解析し、それらを用いて統計的指標である変形特性やループ特性、ケーブル表面出現特性を比較検討する。

以上から CIC 導体内の素線配置の推定が可能となり、具体的な大型 CIC 導体に適用して、課題の究明と対策を行い、特性の向上を図る。

## 4. 研究成果

実際に CIC ケーブル内の素線配置を測定したデータから、素線分布を特徴づける統計的指標を求め、等面積法と遺伝的アルゴリズム法で推定した素線配置から求めた統計的指標を詳細に比較検討した。

その結果、各サブケーブルの重心とその 1 次下のサブケーブルの重心との間の距離の平均距離やその標準偏差、最大距離などは、約 10% 以内で良く一致した。また、面積では、1 次サブケーブルでは良い一致を見たが、高次になると、その誤差は約 20% 程度に増加する。これはコンジット壁付近の素線の密度が実際の導体では低くなるためと考えられる。ツイストピッチでは、各次数ともに測定値と

解析値の平均値，標準偏差やヒストグラムは数%以内で良く一致した。この結果から，ツイストピッチは所々長くなったり短くなったりするが，標準偏差が10%程度に抑えられて，初期のピッチで燃られていることが分かった。また，素線対で構成されるループ長の平均長，標準偏差，最大値等は数%以内で良く一致した。そのループ数も20%程度の差であり，これは解析の場合に微小摂動を加えたためと推測される。外部磁界と鎖交するループ面積の平均値と標準偏差および最大値は20%以内で一致した。ループを構成する素線間の接触長も約20%以内で一致した。さらに，素線のケーブルの表面に出現する確率は1%程度で一致し，標準偏差もヒストグラムも良く一致した。

導体製造パラメータから推定した素線配置は測定結果と統計的に良く一致しているため，交流損失に関係する特性を調べると，ループの鎖交面積は平均値に比べ最大値はその30倍もあり，また標準偏差も平均値の2倍程度あるため，時定数の長い結合損失時定数を有するループがあることが分かった。また，最大のループは導体長が長くなれば，より長いものが現れ，それらが大きな鎖交面積を有し，大きな結合電流が発生して素線にダメージを与える場合もあることが分かった。これらのループ特性はケーブルの形状に大きく依存するので，今後更に詳細に調べていく必要がある。

素線がケーブルの表面に出現する特性は，コイル間の導体接続部の特性に関係する。測定結果と解析結果では，接続長の間で全ての素線が表面に現れるわけではなく，一部は表面に出現せず，また，出現する全ての素線の長さの分散も大きいことが分かった。この結果，接続部で電流は一樣に隣の導体へ移行するのでなく，偏流が起きていることも分かった。この特性は各サブケーブルのツイストピッチによって大きく変化することが分かった。各サブケーブルのツイストピッチを変化させて最適値を求めた結果を，ツイストピッチ変化前の結果と共に図1のヒストグラムに示す。図から，全ての素線がケーブル表面に出現し，かつ，表面に出現する長さの分散も小さくできることが分かった。これにより，接続部の電流偏流現象を防止できることが初めて明確となった。

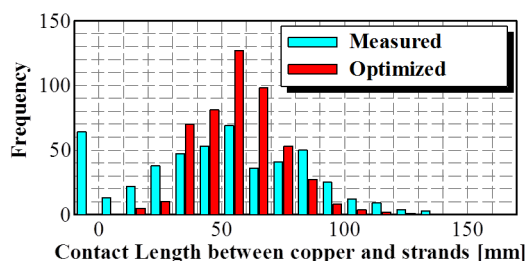


図1. 接続区間での素線がケーブル表面に出現して隣接導体に接触する接触長のヒストグラム

## 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 7件)

1. T. Morimura, D. Miyagi, M. Tsuda, T. Hamajima, T. Yagai, N. Koizumi, Y. Nunoya, K. Takahata, T. Obana, "Study on Resistance Distribution between Superconducting Strand and a Copper Sleeve in a CICC Joint Considering Three-Dimensional Strand Path", to be published in IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 査読有, Vol.24, 2014, pp.4801404-1~4, DOI: 10.1109/TASC.2013.2287713
2. Shinobu NAKAZAWA, Daichi ARAI, Toshiya MORIMURA, Daisuke MIYAGI, Makoto TSUDA, Takataro HAMAJIMA, Tsuyoshi YAGAI, Yoshihiko NUNOYA, Norikiyo KOIZUMI, Kazuya TAKAHATA and Tetsuhiro OBANA, "Analysis of Contact Lengths of Strands with Cu Sleeves in CICC Joints", Plasma and Fusion Research, 査読有, Vol.7, 2012, pp.2403143-1~4, DOI:10.1585/pfr.7.2403143S
3. Tsuyoshi Yagai, Takataro Hamajima, "Ic analysis of Nb3Sn Strand Cable-in-Conduit Conductor under the Electromagnetic Force by the structural Mechanics", Plasam and Fusion Research, 査読有, Vol. 7, 2012, pp.2405026-1~4, DOI:10.1585/pfr.7.2405026
4. S. Nakazawa, S. Teshima, D. Arai, D. Miyagi, M. Tsuda, T. Hamajima, T. Yagai, Y. Nunoya, N. Koizumi, K. Takahata, and T. Obana, "Optimal Pitch Analysis Governing Contact Strand Number and Lengths With Cu Sleeves at CIC Joints", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 査読有, Vol. 22, 2012, pp.4802004-1~4, DOI:10.1109/TASC. 2011.2177616
5. D. Miyagi, S. Teshima, S. Nakazawa, D. Arai, M. Tsuda, T. Hamajima, T. Yagai, N. Koizumi, Y. Nunoya, K. Takahata, and T. Obana, "Analysis of 3-D Locations of All Strands in CIC Conductor", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 査読有, Vol. 22, 2012, pp.4802104-1~4, DOI:10.1109/TASC.2011.2177509
6. Teshima, S. Nakazawa, M. Tsuda, T. Hamajima, T. Yagai, Y. Nunoya, K. Okuno, K. Takahata, "Analysis of strand positions in CIC conductor", Physica C, 査読有, Vol.471, 2011, pp.1550-1553, <http://dx.doi.org/10.1016/j.physc.2011.05.236>
7. 中澤忍, 手島翔太郎, 荒井大地, 宮城大

輔, 津田理, 濱島高太郎, 谷貝剛, 布谷嘉彦, 小泉徳潔, 高畑一也, 尾花哲浩, 「ケーブル・イン・コンジット導体ジョイントにおける超電導素線と銅スリーブ間の接触素線数と接触長分布に関する解析」, 低温工学, 査読有, Vol.46, 2011, pp.474-480, <http://dx.doi.org/10.2221/jcsj.46.474>

〔学会発表〕(計 9 件)

1. 森村俊也, 渡部一晃, 宮城大輔, 津田理, 濱島高太郎, 谷貝剛, 高畑一也, 尾花哲浩, 「CIC 導体の撚りピッチがジョイント部の超電導素線-銅スリーブ間接触状況に及ぼす影響」, 平成 25 年度電気関係学会東北支部連合大会, 2G11, 2013 年 8 月 23 日, 会津大学(福島)
2. T. Morimura, D. Miyagi, M. Tsuda, T. Hamajima, T. Yagai, N. Koizumi, Y. Nunoya, K. Takahata, T. Obana: "Study on Resistance Distribution between Superconducting Strand and a Copper Sleeve in a CICC Joint Considering Three-Dimensional Strand Path", 23th International Conference on Magnet Technology, 2PoAA-06, July 16 2013, Boston America,
3. 森村俊也, 宮城大輔, 津田理, 濱島高太郎, 谷貝剛, 高畑一也, 尾花哲浩, 「CIC 導体ジョイント部における超電導素線-銅スリーブ間の抵抗分布解析」, 第 87 回 2013 年度春季低温工学・超電導学会講演概要集, 1C-p06, p39, 2013 年 5 月 13 日, タワーホール船堀
4. 森村俊也, 荒井大地, 宮城大輔, 津田理, 濱島高太郎, 谷貝剛, 小泉徳潔, 布谷嘉彦, 高畑一也, 尾花哲浩, 「CIC 導体内の素線軌跡を考慮したラップジョイント部における接触抵抗分布解析」, 電気学会超電導応用電力機器研究会, ASC-13-018, pp.91-96, 2013-1-16, 産業技術総合研究所 つくば共用講堂
5. 森村俊也, 中澤忍, 荒井大地, 宮城大輔, 津田理, 濱島高太郎, 谷貝剛, 小泉徳潔, 布屋嘉彦, 高畑一也, 尾花哲浩, 「ケーブル製造工程と弾性エネルギーを考慮した CIC 導体内の三次元素線軌跡の推定」, 電気学会超電導応用電力機器研究会, ASC-12-010, pp53-58, 2012-6-21, 四日市じばさん三重
6. D. Arai, S. Nakazawa, T. Morimura, D. Miyagi, M. Tsuda, T. Hamajima, T. Yagai, Y. Nunoya, N. Koizumi, K. Takahata, T. Obana, "Study on optimization of contact conditions between CIC conductors at joint region", ICEC 24 - ICMC2012, pp.583-586, 15P-P06-11, 15 May, 2012, Fukuoka, Japan
7. Shinobu NAKAZAWA, Daichi ARAI, Toshiya MORIMURA, Daisuke MIYAGI, Makoto TSUDA, Takataro HAMAJIMA, Tsuyoshi YAGAI,

- Yoshihiko NUNOYA, Norikiyo KOIZUMI, Kazuya TAKAHATA and Tetsuhiro OBANA, "Analysis of Contact Lengths of Strands with Cu Sleeves in CICC Joints", 21st International Toki Conference, November 28, 2011, Ceratopia Toki Gifu, Japan
8. 森村俊也, 中澤忍, 荒井大地, 宮城大輔, 津田理, 濱島高太郎, 谷貝剛, 布谷嘉彦, 小泉徳潔, 高畑一也, 尾花哲浩: 「CIC 導体素線のケーブル表面に現れる分布特性について」, 第 85 回 2011 年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集, p54, 2011-11-9, 金沢歌劇座
  9. S. Nakazawa, S. Teshima, D. Arai, D. Miyagi, M. Tsuda, T. Hamajima, T. Yagai, Y. Nunoya, N. Koizumi, K. Takahata, and T. Obana, "Optimal Pitch Analysis Governing Contact Strand Number and Lengths With Cu Sleeves at CIC Joints", The 22th International conference on Magnet Technology, 12 September 2011, Marseille, France

〔図書〕(計 0 件)

なし

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

なし

取得状況(計 0 件)

なし

〔その他〕

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

濱島 高太郎 (HAMAJIMA TAKATARO)  
八戸工業大学・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・教授  
研究者番号: 10267411

(3) 研究分担者

宮城 大輔 (MIYAGI DAISUKE)  
東北大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号: 10346413