

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 25 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360103

研究課題名(和文)大型CIC導体の大電磁力下における素線のキンク変形による特性劣化の原因究明

研究課題名(英文) Study into the cause of property degradation of strands into a cable-in-conduit conductor by kink distortion under the large electromagnetic force

研究代表者

宮城 大輔 (MIYAGI, DAISUKE)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：10346413

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,900,000円

研究成果の概要(和文)：大型超伝導コイルに用いられるケーブルインコンジット(CIC)導体の特性劣化の原因として考えられる偏流現象に関して、撚り乱れを考慮した超伝導の素線軌跡から、ジョイント部における各素線の接触状況による電流分布および素線間ループに誘起する循環電流分布を定量的に評価し、各サブケーブルの撚りピッチが導体内の電流分布不均一性に大きな影響を与えることを明らかにした。さらに、CIC導体表面に位置する素線軌跡から撚り乱れによる梁の長さや循環電流の不均一分布に起因する局所的な電磁力による素線位置の変位量を評価し、素線間接触抵抗、導体形状及びツイストピッチに関して局所的な電磁力を低減するCIC導体構造を示した。

研究成果の概要(英文)：We investigated influence of unbalanced current among strands on local strand deformation in a cable-in-conduit conductor (CICC). The unbalanced current, which is caused by the non-uniform circulating current induced among strands by external magnetic field and inhomogeneous resistance distribution in a joint, causes the local electromagnetic force. The non-uniform circulating current distribution in the CICC was calculated by contact resistances and inductance of the loop between strands with twist deformation. Our results show that local unbalanced current is improved when the n-th order sub-cable twist pitch is a multiple of all the previous sub-cables twist pitch. We estimated the displacement of a strand on the cable surface using beam length in each triplet and circulating current in each loop. In order to prevent local large displacement of a strand, it is effective to prevent unbalanced current distribution, to improve 0.2% strength-proof, and to shorten the beam length.

研究分野：応用電力システム工学，超伝導工学

キーワード：ケーブルインコンジット導体 超伝導コイル 核融合装置 偏流 循環電流 撚り乱れ 素線変形 電磁力

1. 研究開始当初の背景

近年、世界的な人口増加や発展途上国の急速な経済発展により、エネルギー需要が急激に増大している。これに伴い、化石燃料の枯渇や地球温暖化が深刻な問題となりつつあり、来るべき将来に備え、世界各国で省エネルギーの推進や新エネルギーの開発に力を注いでいる。さらには、東日本大震災での原子力発電所の事故を受けて、原子力に代わる新しいエネルギーや発電システムを開発する必要がある。このような世界情勢の中、核融合装置や超伝導電力貯蔵装置 (SMES : Superconducting Magnetic Energy Storage) といった次世代の電気エネルギー発生装置や電気エネルギー貯蔵装置の開発が重要かつ急務となっている。

核融合発電はエネルギー使用と環境保全を両立させる発電方式として非常に有望な発電方式である。発電を目的とした磁場閉じ込め式核融合炉では、損失などの制約から超伝導コイルの使用が必要不可欠となる。磁場閉じ込め式の中でもトカマク型は優れた閉じ込め性能を有し、日本をはじめ世界各国でトカマク方式のプラズマ閉じ込め装置が建設されてきた。現在、国際協力の下、国際熱核融合実験炉 (ITER : International Thermonuclear Experimental Reactor) 計画が進行している。ITER 計画において、日本は中心ソレノイド (CS : Center Solenoid) モデル・コイルの R & D を、日本原子力研究開発機構を中心に行い、大きな成果を収めてきた。一方、日本の核融合科学研究所ではヘリカル型磁場閉じ込め方式の大型ヘリカル装置 (LHD : Large Helical Device) が建設され、プラズマの生成・閉じ込め研究が行われており、これまでに、定常運転の実証や優れた閉じ込め性能を確認するなど、良好な成果を収めてきた。

核融合装置や SMES 用の大型超伝導コイルに用いる大電流容量导体には、複数の超伝導素線を撚り合わせて金属管 (コンジット) の中に収納した、ケーブル・イン・コンジット (CIC : Cable-in-Conduit) 导体と呼ばれる导体が広く採用されている。超伝導線 (極細多芯線) の素線 1 本の電流容量は、通常の磁界下で ~ 数百 A 程度であるが、核融合装置用超伝導コイルなどに用いられる超伝導导体では、~ 数十 kA 級の電流容量が要求されるため、多数の素線を多段階に撚り合わせる多重撚り線構造により複合化した CIC 导体が用いられている。図 1 に示すように、一般的には 3 本 (トリプレット) を単位とした $3 \times n \times m \times \dots$ (n, m は整数で 3~6 程度) のトリプレット型ケーブル構成が用いられる。このとき、各段階のケーブルをサブケーブルと呼び、ツイストされた各サブケーブルの 1 ピッチ分の長さを撚りピッチ (ツイストピッチ) といい、通常、高次のサブケーブルほど撚りピッチは長くなる。

CIC 导体は機械的に優れた特性を有する

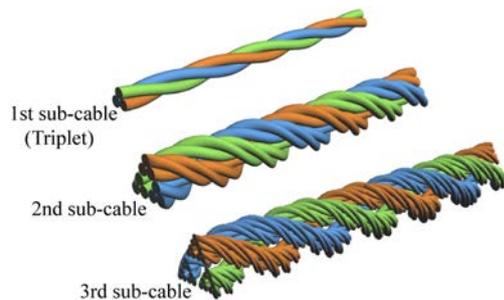


図 1 CIC 导体内の超伝導素線の撚り線構造

が、一方で不安定性や不規則な損失増大などの問題が報告されている。核融合装置用超伝導コイルでは、励磁速度を速くすると不安定になる Ramp Rate Limitation (RRL) 現象が確認されている。日本原子力研究所 (現日本原子力研究開発機構) で行われた実証ポロイダルコイルの超伝導特性評価試験では、直流において定格電流値までの通電に成功したが、パルス運転において定格の約 40 % で导体の一部の超伝導状態が崩れ、常伝導部が発生するという不安定性が確認されている。また、別の高磁場下における大電流通電時の実験では、素線がキンク変形を起こして、导体性能が劣化する現象が報告されており、これらの原因を早急に解明して、キンク変形を発生させること無くある程度速い励磁速度においても大電流を安定して通電できる大型 CIC 导体を開発することが早急の課題である。

2. 研究の目的

CIC 导体では、导体の電流密度を高めるためにボイド率 (空隙率) が 40% 以下になるまでケーブルを圧縮してコンジットに収納する。この際、圧縮力により素線が変位し規則的なケーブル構造が崩れる、いわゆる、撚り乱れが生じる。実際に导体内部で理想的な位置から大きく変位した素線が存在することが確認されており、この撚り乱れによる各超伝導素線間のインダクタンスの違いにより、各素線に流れる電流値が異なったり、外部磁界と鎖交する磁束の違いで各素線間に遮蔽電流が誘起されたりすることで导体断面内の電流分布が不均一になり、高磁界下では局所的に大きな電磁力が印加されると考えられる。ゆえに、本研究では、CIC 导体内部の素線の複雑な撚り乱れに起因する不均一な電流分布による局所的な電磁力を定量的に評価するとともに、局所的な電磁力とキンク現象の関係を明らかにし、キンク変形現象が生じにくい导体構造を明確にする。

3. 研究の方法

CIC 导体内の三次元素線配置を用いて、素線の撚り乱れを考慮した等価回路モデルを構築し、导体性能を決定する上で重要なダイナミクスな電流分布解析を行い、CIC 导体の電流分布を明らかにするとともに、撚り乱れによる偏流の影響を正確に評価する。さらに、電流分布から各素線にかかる電磁力を定

量的に評価することで、電磁力がどの程度で素線のキンク変形が生じるかを明らかにする。さらに、この素線のキンク変形現象が、CIC 導体構造の何に大きく寄与しているかについても明らかにする。

4. 研究成果

(1) CIC 導体内に誘起される循環電流分布素線間ループは、図 2 に示すように三次元的に複雑な形状をした単一ループコイルと捉える事が出来る。また、素線間ループの端部では、素線間の接触抵抗が生じている。これらより、図 3 に示すように素線間ループをループインダクタンスとループ両端の素線間接触抵抗による LR 回路と定義する。 L はループインダクタンス、 S_i はループの鎖交面積、 B は外部印加磁場、である。なお、ITER TF 導体は、ケーブルを構成する素線に銅素線が含まれている。銅素線を含む素線間ループについては、LR 回路の抵抗成分として、銅素線抵抗を考慮しなければならない点に注意する。

ループインダクタンスは、素線間ループに流れる電流を線電流と仮定し、ベクトルポテンシャルを用いて導出する。素線間接触抵抗は、素線間接触コンダクタンス測定値と素線軌跡による接触長から推定した値を用いる。誘導起電力 V は、電磁誘導則より、素線間ループに鎖交する磁束の時間変化量により、求めることが出来る。素線間ループは、三次元的に複雑な形状をしているため、写像面積を考える際に「三次元的には非接触だが、写像面上では交差する点」が存在し、これを「写像交差点」とする。図 4 にこの様子を示す。電磁誘導則より、写像交差点の前後で素線に誘起される起電力の方向が逆転するため、素線間ループ全体に生じる誘導起電力が減少

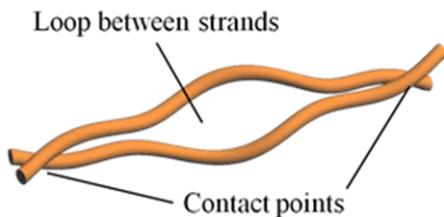


図 2 素線間ループの概略図

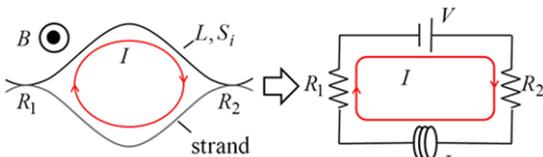


図 3 素線間ループの電気回路図

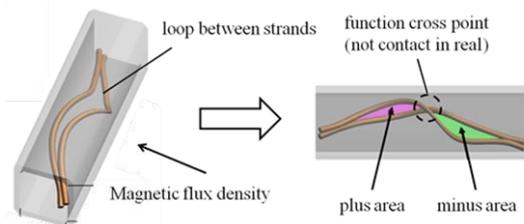


図 4 素線間ループの鎖交面積の定義

表 1 LHD OV 導体用 CIC 導体諸元

Strand diameter [mm]	0.89
Critical current of strand [A]	200
Surface coating	None
Sub-cable pattern	3×3×3×3×6
Cable size [mm]	20.5×24.8
Cable length [mm]	4000
Twist pitch [mm]	70 / 120 / 170 / 250 / 400
Operational current [kA]	31.3
Maximum magnetic flux density [T]	5.0
duration of current increasing area [s]	156.5

表 2 ITER TF 導体用 CIC 導体諸元

Strand diameter [mm]	0.823
Critical current of strand [A]	200
Surface coating	chrome
Sub-cable pattern	(2SC+1Cu)×3×5×5×6
Cable diameter [mm]	40.6
Cable length [mm]	4500
Twist pitch [mm]	45 / 85 / 130 / 250 / 450
Operational current [kA]	68
Maximum magnetic flux density [T]	11.8
duration of current increasing area [s]	340

する。このような鎖交面積の「相殺」に注意し、ループの写像面積を導出する。

本研究では直線 CIC 導体に対し、導体の長手方向に垂直な、ある方向からのみ変動外部磁場を印加するモデルを考える。本来の導体運転時には、循環電流と同時に電源からの輸送電流が流れるが、モデル上では輸送電流分布を無視することとする。また、核融合用超伝導コイルでは励磁電流が台形波となるため、外部磁場波形を導体の励磁電流に比例した台形波とし、超伝導コイルの運転電流時（励磁電流最大時）に外部磁場が最大になると見なす。表 1 に LHD OV 導体用、表 2 に ITER TF 導体用の CIC 導体諸元や運転電流や最大磁場、台形波の立ち上がり時間幅などを示す。計算に用いた導体長は、最終撚りピッチの値の 10 倍とし、どちらの導体についても、電流のスweepレートを 200 A/s、フラットトップ領域（運転電流時）の時間幅を 10s とした。また、LHD OV 導体の素線間接触コンダクタンスを 1.1×10^8 S/m、ITER TF 導体のそれを 4.4×10^7 S/m とした。

CIC 導体内には、多数の素線間ループが存在し、磁氣的に相関があると考えられるが、本研究では各素線間ループが磁氣的に独立した状態であると仮定し、各素線間ループにおける LR 回路に発生する誘導電流をそれぞれ求め、その総和を取ることによって循環電流分布を求めた。時定数に対して十分長い時間、一定の変動外部磁場を印加された場合の LR 回路に生じる誘導電流は、自己・相互インダクタンスの値に関係なく、誘導起電力と抵抗値のみで決まる。よって、循環電流分布の評価に、このモデルは十分有効であると考えられる。

上記のモデルより、フラットトップ領域に達した時刻の LHD OV 導体内の 4 次サブケーブル内 (81 素線) の循環電流分布を図 5 に、ITER TF 導体内の 4 次サブケーブル内 (銅素線コアを除いた 150 素線) の循環電流分布を図 6 に示す。LHD OV 導体の結果は、誘起された循環電流が一番大きな素線を含む結果である。ITER TF 導体モデルでは、各 4 次サブケーブルにステンレスラップが巻かれているため、異なる 4 次サブケーブル間では素線間ループは作らないと仮定している。

LHD OV 導体モデルでは、磁場の時間変化率は、 $5.0 \text{ T} / 156.5 \text{ s} = 0.032 \text{ T/s}$ となり、素線 1 本当たりの平均輸送電流は約 60 A である。なお、電流値の符号は、電流成分の導体長手方向 (z 軸) の符号を示す。導体内に生じる循環電流分布は、非常に不均一なものとなる。また、生じる電流値も大きく、電源からの輸送電流が均一であると仮定すると、ある素線の一部の箇所では、臨界電流を超えた電流が流れようとする。よって、このような箇所ではクエンチ現象が起き得る。また、輸送電流とは逆方向に大きな循環電流が生じている箇所では、素線を通る電流の方向が、周囲の他の素線とは逆向きになる。このような箇所では、素線に働く電磁力が他の素線に働くものとは逆方向になるため、局所的に大きな電磁力が印加されることが予想される。よって、導体内に生じる不均一な循環電流分布は、素線のクエンチ現象や導体内の不均一な電磁力分布といった問題を引き起こす可能性がある。

ITER TF 導体モデルでは、磁場の時間変化率は $11.8 \text{ T} / 340 \text{ s} = 0.035 \text{ T/s}$ で、素線 1 本当たりの平均輸送電流は約 75 A であり、励磁条件に大きな違いは無いが、不均一な電流値は LHD OV 導体モデルに比べて小さくなった。このような結果の違いとして、2 つの原因が考えられる。1 つ目は、素線表面のクロム被覆の影響である。素線表面のクロム被覆により、素線間接触抵抗が大きくなり、素線間ループに生じる誘導電流が小さくなるためである。2 つ目は、サブケーブル内の銅素線の影響である。銅素線は、常伝導状態であるため、銅素線を含む素線間ループの抵抗成分は、素線間接触抵抗と銅素線抵抗の総和である。よって、銅素線を含む素線間ループの誘導電流が小さくなるため、誘導電流の総和を取ることで求めた電流値も小さくなる。これらを確かめるため、「全素線が超伝導素線」であり、「素線被覆が施されていない」導体を仮定する。これを「仮想導体」と呼ぶ。図 7 に仮想導体の循環電流分布を示す。図 6 に比べ、全体的に電流値が大きくなることから、前述したクロム被覆と銅素線の影響が大きいことがわかる。よって、LHD OV 導体に比べ、ITER TF 導体の循環電流分布は小さくなる。以上より、CIC 導体内に生じる循環電流分布を解析したところ、電流分布は不均一となり、輸送電流の影響も考慮すると、特に LHD

OV 導体モデルの導体構造に関して、偏流現象による不安定な運転、または素線のクエンチが起き得ることが示された。

(2) 偏流現象を抑制する導体構造 偏流現象を抑制する導体構造として、導体ジョイント部における素線軌跡が素線-銅スリーブ間抵抗分布に与える影響と素線軌跡が導体内の循環電流分布に与える影響について検討を行った。ジョイント部における素線-銅スリーブ間抵抗分布を改善するのは、最終撚りピッチの値に対し、高次 (3, 4 次) の撚りピッチが、共に「最終撚りピッチとの比が整数となる」ときである。これは、「3~5 次の撚りピッチの最小公倍数 = 最終撚りピッチ長」となることを意味している。一方、導体内の循環電流分布を抑制するのは、「素線軌跡の周期長が短くなる」とき、つまり撚りピッチの最小公倍数が小さくなる時である。ゆ

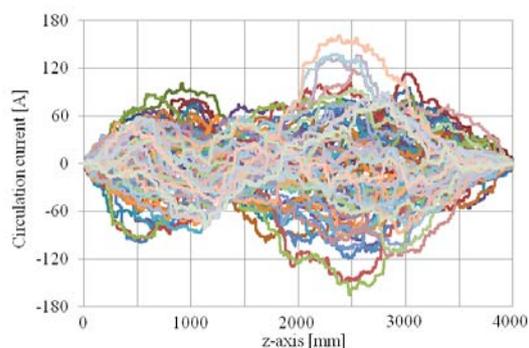


図 5 LHD OV 導体モデルの 4 次サブケーブル内 (81 素線) の循環電流分布

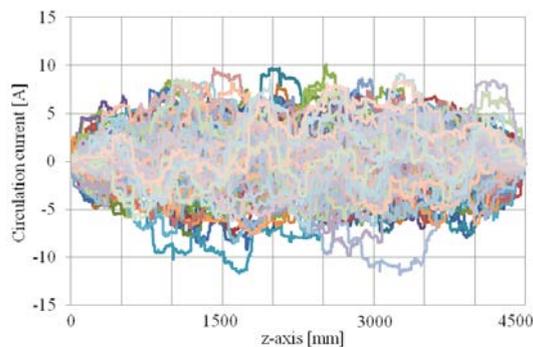


図 6 ITER TF 導体モデルの 4 次サブケーブル内の循環電流分布

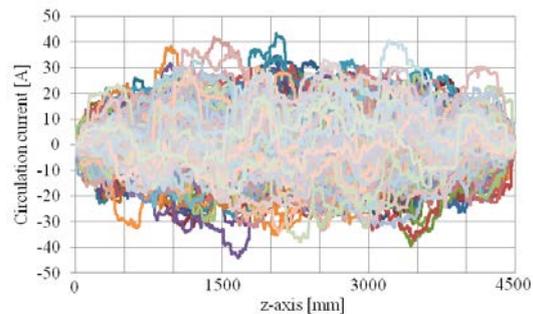


図 7 素線被覆が施されていないと仮定した ITER TF 導体モデルの 4 次サブケーブル内の循環電流分布

えに、「1~5 次の撚りピッチの最小公倍数(素線軌跡の周期長) = 最終撚りピッチ長」となるような撚りピッチの組み合わせが循環電流の抑制には有効であると考えられる。以上より、導体ジョイント部の不均一な抵抗分布と、導体内の不均一な循環電流分布を同時に改善する導体構造として、「撚りピッチの最小公倍数 = 最終撚りピッチ長」となる撚りピッチの組み合わせが挙げられる。表 3 に、LHD OV 導体モデル及び ITER TF 導体モデルについて、このような条件を満たす撚りピッチの例を示す。これらの撚りピッチの値は、導体によらず、「1~4 次の撚りピッチの整数倍が最終撚りピッチである」こと、「撚りピッチの最小公倍数 = 最終撚りピッチ長となる」ことが特徴である。

表 3 に示す撚りピッチを改善した LHD OV 導体モデルの導体内の循環電流分布を図 8 に示す。全素線中、最も電流値が大きくなった素線を含む 4 次サブケーブル(81 素線)分の電流分布を示している。撚りピッチを改善した導体モデルについて、導体内に生じる循環電流分布は、図 5 に示す元の仕様のモデルに比べ、抑制されている。なお、元の仕様の導体は、素線軌跡の周期長が非常に長く、今回の解析では内部の電流分布を完全に把握することが出来ていないが、ループ長が非常に長い素線間ループが存在し得ることから、電流分布はさらに値が大きく、不均一になる可能性が考えられ、撚りピッチを改善した導体モデルでは、導体内の循環電流分布が大幅に抑制される。ITER TF 導体モデルについても、LHD OV 導体と同様に、撚りピッチを改善したモデルの循環電流分布を図 9 に示す。なお、ここでは、構造による循環電流への影響を検討するため、銅素線やクロム被覆の無いモデルで検討を行った。LHD OV 導体と同様、撚りピッチを改善した導体モデルでは、図 7 に示す元の仕様のモデルに比べて、循環電流分布は大幅に抑制されている。

また、両導体モデルにおいて撚りピッチを改善したモデルでは、導体ジョイント部における素線-銅スリーブ間の不均一抵抗分布も大幅に改善し、フラットトップ領域での素線間で転流が見られない結果が得られた。

以上より、コンジットの形状に関わらず、「撚りピッチの最小公倍数=最終撚りピッチ長」となるような撚りピッチの組み合わせを持つ導体構造が、導体ジョイント部における素線-銅スリーブ間の不均一抵抗分布及び不均一な循環電流分布を抑制し、偏流現象の抑制に有効であることが示された。さらに、適切な撚りピッチの組み合わせが、局所的に印加される電磁力の軽減にも有効であることが示された。

(3) CIC 導体内の循環電流が素線変形に及ぼす影響 検討した CIC 導体の諸元を表 4 に示す。図 10 に示す様に、CIC 導体に通電し、導体中の 2 素線で形成される素線間ループに変動磁場が印加されると、この素線間ループ

には循環電流が誘起される。特に循環電流が大きい場合は、輸送電流と循環電流の和が、ループを構成する 2 素線で逆向きとなり、その結果として、両素線に逆方向電磁力が作用する。特にこの様な逆方向電磁力が導体表面の素線で発生した場合にキック変形の要因となり得るかを検討するために、撚り乱れを考慮した CIC 導体の素線軌跡を用いて、1 方向磁場を 0.0347T/s の速さで印加した際の 11.8T の瞬間の導体内の電流分布を評価した。図 11 に逆方向最大電磁力が働く素線での導体表面梁の位置に対する逆方向循環電流の絶対値の分布を示す(導体表面梁以外の箇所はゼロ)。局所的な逆向きの電磁力による素線の変位量は梁長に大きく依存するため、磁界と導体表面梁区間の循環電流値と梁長の積を変位評価指数と定義し、各素線内で評価指数が最大となる梁をピックアップし、それを全素線間で比較を行い、評価指数が最も大きな 5 素線の変位量、最大応力値および最大歪を表 5 に示す。素線に局所的に印加される最大応力値に着目すると、0.2%耐力である 160MPa を大幅に超える素線が複数本存在しており、循環電流による局所的な応力により劣化する可能性が示唆された。

表 3 LHD OV 導体モデル及び ITER TF 導体モデルの撚りピッチ改善例

Model	Improved twist pitches [mm]
LHD OV	40 / 80 / 100 / 200 / 400
ITER TF	30 / 56.25 / 112.5 / 225 / 450

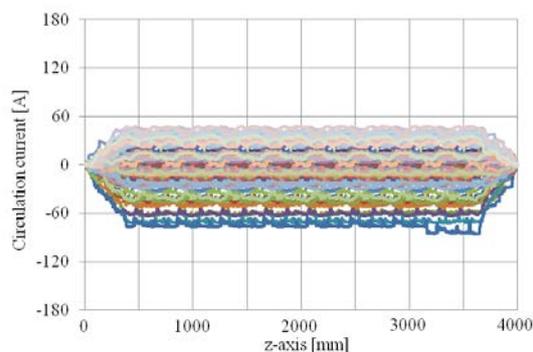


図 8 LHD OV 導体撚りピッチ改善モデルの 4 次サブケーブル内(81 素線)の循環電流分布

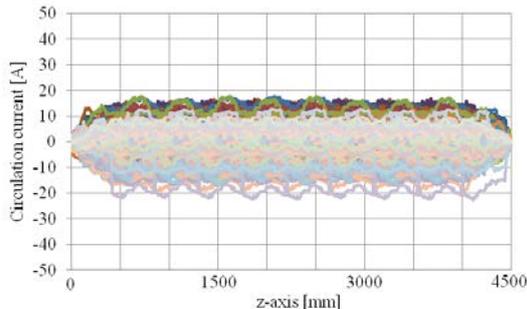


図 9 素線被覆が施されていないと仮定した ITER TF 導体撚りピッチ改善モデルの 4 次サブケーブル内の循環電流分布

(4) CIC 導体の性能劣化の低減に関する検討素線の変位を低減するための手法として、局所的な電磁力を低減するために循環電流の局所的な不均一性を低減する手法が考えられる。これに関しては、(2)により、各サブケーブルの撚りピッチを「1~4次の撚りピッチの整数倍が最終撚りピッチである・撚りピッチの最小公倍数 = 最終撚りピッチ長となる」となるように選定することで循環電流の局所的な不均一性を抑制でき、循環電流も大幅に軽減されることが示されており、撚りピッチを適切に選定することは性能劣化の低減に対して有効である。また、0.2%耐力は材料が素線変形しにくいことを示す指標であり、変位抑制や残留歪の軽減には、0.2%耐力が向上されることは有効である。そこで、0.2%耐力が300MPaとしたときの素線番号169および147の変位量の計算を行った。その結果、素線番号169では、変位が0.52mmとなり梁内の一部箇所が耐力を下回り弾性変形領域内に留まった。素線番号147では、変位が0.16mmで梁内の全領域において弾性変形領域内となり、0.2%耐力の改善も性能劣化の低減に有効であることを定量的に示した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

- ① D. Miyagi, S. Nakazawa, D. Arai, T. Morimura, M. Tsuda, T. Hamajima, T. Yagai, N. Koizumi, Y. Nunoya, K. Takahata and T. Obana; “Comparison of Analytical Estimation and 3-D Measurement of All Strands Location in CIC Conductor,” *IEEE Trans. Applied Superconductivity*, 査読有, 23巻, 2013, 8400904 頁, DOI: 10.1109/TASC.2013.2246754.
- ② D. Miyagi, T. Morimura, K. Watanabe, M. Tsuda, T. Hamajima, H. Kajitani, Y. Nunoya, N. Koizumi, and K. Takahata; “Influence of Twist Pitch in CICC on Contact Condition Between Individual Superconducting Strands and a Copper Sleeve in a Lap Joint,” *IEEE Trans. Applied Superconductivity*, 査読有, 25巻, 2015, 4801905 頁, DOI: 10.1109/TASC.2014.2374151.

〔学会発表〕(計11件)

- ① 宮城大輔, 「CIC 導体内の循環電流が素線変形に及ぼす影響の検討」, 第91回2015年度春季低温工学・超電導学会, 2015.5.27-29, 産業技術総合研究所つくばセンター共用講堂(茨城県・つくば市)
- ② D. Miyagi, “Effect of combination of twist pitches on distribution of strands appearing on cable surface in CICC”, *CHATS on Applied Superconductivity 2013*, 2013.10.10, Cambridge, MA USA

表4 CIC 導体諸元

Strand diameter [mm]	0.823
Sub-cable pattern	3×3×5×5×6
Cable length [mm]	4500
Twist pitch [mm]	45 / 90 / 135 / 225 / 450
Operational current [kA]	68
Maximum magnetic flux density [T]	11.8
Young's modulus of strand [GPa]	130
0.2% proof strength of strand [MPa]	160
Tangent modulus of strand [GPa]	29.92

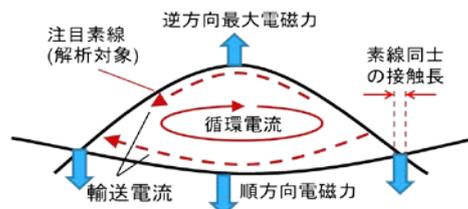


図10 素線間ループに誘起する循環電流分布および電磁力のイメージ図

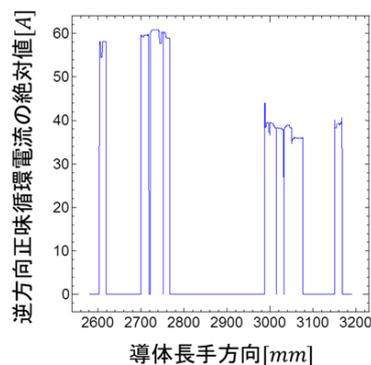


図11 逆方向最大電磁力が働く素線での導体表面梁の位置に対する逆方向循環電流の絶対値の分布

表5 評価指数が最も大きな5素線の変位量, 最大応力値および最大歪

素線番号	梁長 [mm]	逆循環電流 [A]	変位量 [mm]	最大応力 [MPa]	最大歪 [%]
169	43	-42.8	1.67	450	1.37
147	43	-37	0.78	250	0.84
142	39	-17.2	0.75	180	0.6
97	33.5	-26	0.51	180	0.6
113	39	-9.34	0.15	50	0.038

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(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