

令和元年6月18日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K06654

研究課題名(和文) ケーブル・イン・コンジット導体への捩り付加による臨界電流向上の実証研究

研究課題名(英文) Demonstration research for improvement of the critical current of cable in conduit conductor with additional torsional strain

研究代表者

今川 信作 (IMAGAWA, Shinsaku)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授

研究者番号：10232604

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：捩り付加による臨界電流向上を実証するため、バネ形状の試験コイルを提案し、液体ヘリウム中での試験方法を策定した。次に、Nb<sub>3</sub>Snケーブル・イン・コンジット縮小導体の試作を行い、コンジット(SUS管)の縮径やバネ形状への成形など、試験サンプル作成における技術課題を明らかにした。並行して、ワインド・リアクト・トランスファー法のヘリカルコイルへの適用可能性を検討した。コイルに対してトロイダル方向に12°程度回転させた位置に熱処理炉を兼ねた巻枠を設置する方法を提案し、構造解析により巻枠から最終位置に導体をトランスファーする際の最大ひずみが0.15%以下に収まることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

コンジットの捩り加工による超伝導特性の改善効果の実証までは至らなかったが、一連の研究において、ケーブル・イン・コンジット導体に捩り変形を加える際に超伝導燃線に生じるひずみはコンジットに生じるひずみの数分の1以下と小さいことが明らかにした。この成果は、ひずみに対して脆いNb<sub>3</sub>Sn線材を用いる超伝導マグネットの製作上の取り扱いを容易とする重要な知見である。また、ワインド・リアクト・トランスファー法がヘリカルコイルにも適用可能であることを示したことは、ヘリカル型核融合炉のヘリカルコイルが現在製作中のITERの超伝導マグネットと同等の技術で製作可能であることを示す重要な成果である。

研究成果の概要(英文)：In order to prove improvement of critical current by being twisted, I proposed a spring-shaped test coil and settled on the test method in liquid helium. I tried to make a small-scale Nb<sub>3</sub>Sn cable-in-conduit conductor, and made clear technical subjects for making the testing sample, such as reduction of the conductor diameter and shaping the conductor into a spring shape. In parallel, a concept of helical winding with a wind, react, and transfer method was studied. I proposed a new method to install a winding core with function as an oven in the position rotated by 12 degree in the toroidal direction from the helical coil, and showed that the maximum strain during transfer the conductor from the winding core to the final position can be restrained in less than 0.15 % by an analysis using a finite element method.

研究分野：超伝導工学

キーワード：ケーブル・イン・コンジット 超伝導 ねじり ひずみ 臨界電流

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

超伝導コイルは、クエンチ保護時の最大電圧の制限により、磁気エネルギーが大きくなるほど大電流導体が必要となる。核融合炉用超伝導コイルには強磁場中で 50 kA を超える大電流導体が必要とされるため、強大な電磁力に耐えられる大電流導体の開発が進められてきた。撚線とそれを囲む金属管（コンジット）から構成される、ケーブル・イン・コンジット導体は、超伝導素線が超臨界圧ヘリウムで直接冷却されるため冷却安定性が高く、ステンレス鋼などのコンジットで囲われているため機械強度に優れていることから、大電流・高磁場導体に適している。国際熱核融合実験炉 ITER 用に、最大経験磁界が 12-13 T で電流値が約 70 kA の Nb<sub>3</sub>Sn ケーブル・イン・コンジット導体が開発された。

しかしながら、導体製造過程での熱ひずみに加えて電磁力によるひずみによる超伝導特性の低下が明らかになり、性能低下を考慮した導体設計を余儀なくされている。Nb<sub>3</sub>Sn 超伝導線が優れた超伝導特性（高い臨界磁場、高い臨界電流、高い臨界温度）を得るためには 650~750°C の熱処理が必要であるが、Nb<sub>3</sub>Sn は銅やステンレス鋼に比べて線膨張係数が半分程度であるため、冷却過程で圧縮ひずみが生じる。Nb<sub>3</sub>Sn は化合物であるため延性がなく、この熱ひずみによって臨界電流が大きく低下することが大きな欠点となっており、この圧縮ひずみを軽減することができれば、超伝導特性を大きく改善することが可能となる。ケーブル・イン・コンジット導体の超伝導線は、直径 1 mm 程度の素線を多重に撚り合わせたものであり、これらの素線の動きを抑制するためにコンジットは縮径加工が施されて超伝導撚線と密着している。この撚り構造に着目することにより、コンジットを撚線の最終撚りと同方向に捩ることによって、超伝導線を伸ばし、導体製造過程で生じる軸方向圧縮ひずみを軽減するという着想に至った。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、超伝導線の撚りと同じ方向にコンジットを捩ることによって、超伝導線の圧縮ひずみが軽減されて超伝導特性が向上することを実証し、本方式の大型導体への適用可能性を示すことである。この研究によって、ケーブル・イン・コンジット導体の性能向上が期待できるだけでなく、コンジット内の超伝導撚線のひずみの挙動についても重要な知見が得られることが期待できる。

本研究により、熱処理後のコンジットの捩り加工によって超伝導特性が大きく改善することが明らかになれば、超伝導線材の本数の大幅な削減やさらなる高磁場コイルの製作が可能となることが期待される。特に、ヘリカルコイルに適用する場合には、小さいピッチ長で熱処理を行ったケーブル・イン・コンジット導体をピッチ長を上げながら巻線することにより、超伝導特性を改善させる効果が期待できることになり、性能の向上に加えて熱処理および巻線作業性にも非常に大きな改善効果が期待できる。

### 3. 研究の方法

本研究では、実際にケーブル・イン・コンジット超伝導導体に捩りを加えることにより、臨界電流が向上することを実証する。申請時は、Nb<sub>3</sub>Sn 超伝導線と銅線と撚り合わせて、1 m 程度の長さのケーブル・イン・コンジット超伝導導体を複数製作し、各々を異なるピッチ長でバネ形状に巻線した後に超伝導生成熱処理を行い、このバネ形状の試験コイルの長さを所定の値に変えることによりコンジットに捩りひずみを加え、液体ヘリウム中で臨界電流の変化を測定する計画であった。しかし、均一なサンプルを製作することが困難であることが分かり、バネ形状の試験コイルの長さをクライスタットの外部から変えることのできる実験治具を製作することにより、1つのサンプルで連続的に捩りひずみを変えて臨界電流を測定するように計画を変更した。まず、実験サンプルのケーブル・イン・コンジット縮小導体 1本を製作する。1本の Nb<sub>3</sub>Sn 線と 17本の銅線が撚り合わされた 3本撚りのサブケーブル 6本を製作し、次に、冷却チャンネルを模擬して直径 1.6 mm のステンレス管を中心に配置し、その回りに 6本のサブケーブルを 60 mm 程度のピッチ長で巻き付けてコンジットに挿入する。コンジット材にはステンレス管を使用し、撚線挿入後に 35%程度のポイド率（断面内の空隙の割合）となるように治具を用いてコンジットを縮径する。続いて、治具を用いてバネ形状に巻線してから超伝導相の生成熱処理を行い、1本目の実験サンプルを製作する。このサンプルをバネ長さを制御できる試験治具に取り付け、9 T の外部磁場コイルを備えた小型クライオスタットに設置する。液体ヘリウムで冷却し、バネ長さを変えて臨界電流の変化を測定することにより、Nb<sub>3</sub>Sn 線の臨界電流に対するコンジットの捩りの効果を調べる。その結果を評価し、必要によってはサンプルの設計を見直して、2本目の実験サンプルを製作し、同様の実験を行う。次に、Nb<sub>3</sub>Sn 素線の文献値を用いて、この臨界電流の変化から超伝導線の軸方向ひずみの変化量を評価し、その値を導体の構造解析の結果と比較することにより、大型導体や異なる形状の導体に本方式を適用する場合の臨界電流の変化を予測可能とする。さらに、この研究成果を実際の超伝導コイルに適用する方法について、コイル巻線方法と合わせて検討する。

### 4. 研究成果

#### (1) サンプルの設計と試験計画

ヘリオトロン型核融合炉のヘリカルコイルに、ITER に採用されているような Nb<sub>3</sub>Sn ケーブル・イン・コンジット (CIC) 導体を用いる巻線法を検討した。ヘリカル形状に巻線した後に生成

熱処理を行う場合には、巨大な熱処理炉に加えて、高温に耐える無機絶縁材の使用が必要と考えられ、コストや耐電圧性能で不利となることが懸念される。そこで、図1に示すように、円筒ポピンでCIC導体の熱処理を行った後、バネを引き伸ばすように導体にねじりを加え、絶縁材を巻き付けながらヘリカル形状に巻線するリアクト・アンド・ワインド法の適用を検討した。主半径が16 m程度のヘリカル炉に外径45 mmのCIC導体を用いて図1のような巻線を行うと、コンジット表面には最大で0.7%のねじりひずみが生じることになる[②]。一方、コンジット内の超伝導線は、最終撚り方向と同じ方向に導体をねじると超伝導線に引張応力が生じることが実験でも確認されており、この性質を利用することにより、熱処理後の熱収縮差で超伝導線に生じている残留圧縮ひずみがヘリカル巻線によって軽減され、超伝導特性が改善される効果が期待できる。ただし、バネを延ばす際の変形は純ねじりであり、導体長手方向には圧縮・引張ひずみが生じないので、超伝導線に生じる圧縮・引張ひずみは撚りによって傾いている分だけであり、また、コンジットに対して滑ることによって緩和されると考えられるため、残留圧縮ひずみの軽減効果は小さいと予想される。むしろ、コンジットの塑性変形のために予期せぬひずみが加わって超伝導特性が劣化する可能性もある。そこで、縮小導体を用いて熱処理後のねじりの影響を評価する。

試験コイルの仕様を想定するヘリカル炉のヘリカルコイルと比較して表1に示す。まず、1本の $Nb_3Sn$ 線と17本のCu線を撚り合わせて外径約5 mmの縮小CIC導体を作成する。次に、外径50 mm程度の巻枠に巻き付けることにより5ターンのコイル形状に加工してから熱処理を行い、試験コイルを製作する。この試験コイルを、図2に示すように上下2分割の試験治具に取り付けて、下側の可動ホルダーを動かすことによりコイル長さを変えることにより縮小CIC導体にねじりを印加する。試験コイルは、核融合科学研究所の小型導体試験装置に設置して液体ヘリウムによって4.2 Kまで冷却され、9 Tまでの外部磁場中で500 Aまでの電流を流して臨界電流を測定する。天板に取り付けた回転導入端子を用いて2分割の下側ホルダーを上下に移動させることによりコイル長を変え、コイル長さと臨界電流の関係を調べる。

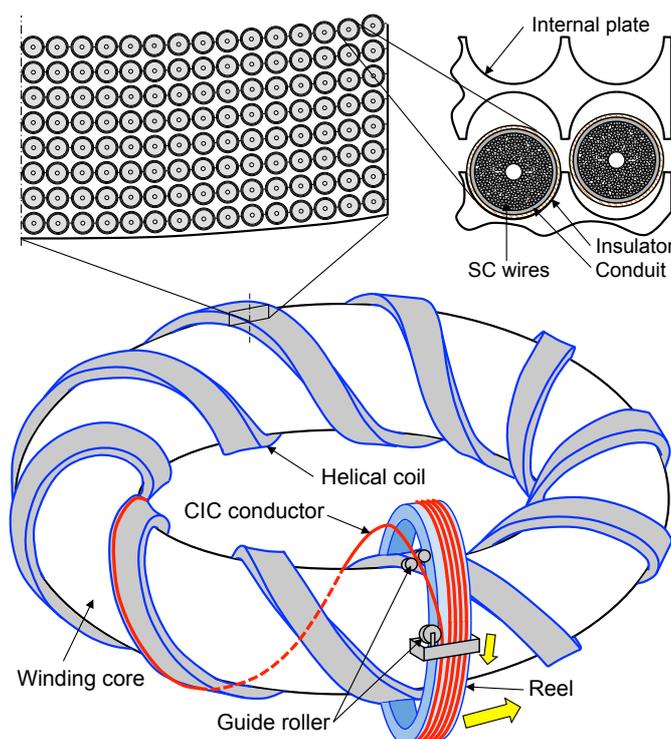


図1 リアクト・アンド・ワインド法によるヘリカル巻線概念

表1 試験コイルの仕様とヘリカル炉ヘリカルコイルとの比較

| 項目              |    | 試験コイルA              | ヘリカル炉  |
|-----------------|----|---------------------|--------|
| 銅線外径            | mm | 0.75 (0.8と0.7を半分ずつ) | 0.82   |
| 最終撚りピッチ         | mm | 56                  | 440    |
| 内管外径            | mm | 1.6                 | 8      |
| 配管外径 (縮径前)      | mm | 6                   |        |
| ボイド率 (縮径後)      |    | 0.35                | 0.34   |
| 配管外径 (縮径後)      | mm | 4.76                | 43.4   |
| 導体中心曲げ半径        | mm | 25.1                | 500.0  |
| 製作時/圧縮/引張時の巻ピッチ | mm | 15.0/5.0/25.0       |        |
| 導体のねじりひずみ       |    | ±0.0060             | <0.007 |

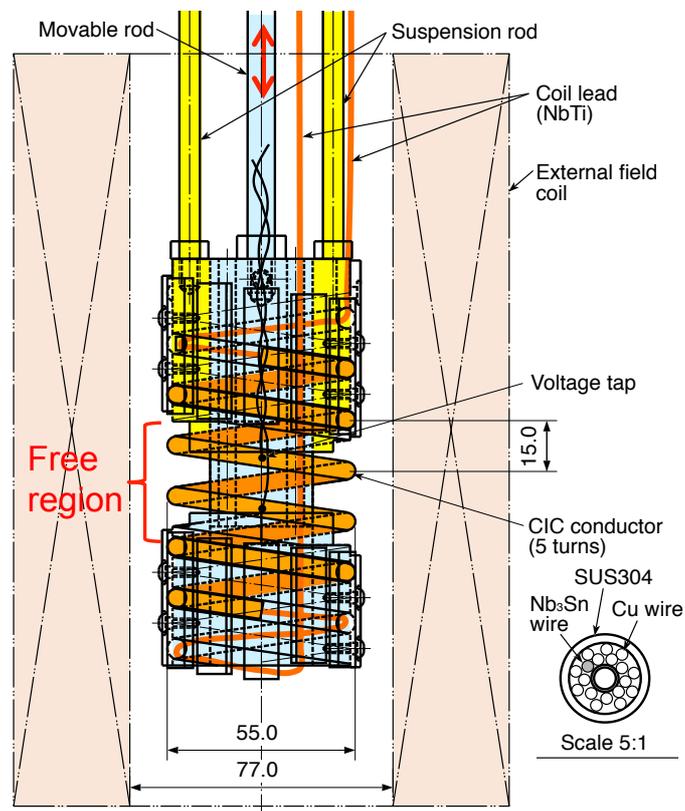


図2 CIC試験コイルとねじり印加のための試料ホルダー

(2) サンプルの製作と実験準備

試験サンプルの製作においては、まず、図3に示すように、約1 m長さの銅線3本を撚り合わせて3本撚りを5セット製作した。次に、 $Nb_3Sn$ 線（外径:0.798 mm, ツイストピッチ:50 mm, 銅比:0.25, 銅の残留比抵抗 RRR:175, フィラメント径:2  $\mu m$ , 臨界電流:485 A at 9.0 T) 1本と銅線2本を撚り合わせた3本撚りを製作し、直径1.6 mmのステンレス管の回りにこれらの6セットのサブケーブルを60 mm程度のピッチ長で巻き付けて撚り線を完成させた。図4に示すように、この撚り線を外径6 mmのコンジットに挿入した後、図5に示す縮径治具を用いて、導体外径の縮径を試みた。本研究で開発した2組のローラー治具を用いて外径5 mm程度にまで徐々に縮径することを試みたが、管の断面が2組のローラーの各々で楕円形に変形するために計画したようには縮径を進めることができない問題が生じた。そのため、平成30年度は、超伝導線材等の伸線過程において採用されているダイスを用いた引き抜き加工を適用できるのではないかと考えて、2種類のダイスを製作して、サンプル用導体の製作を進めた。しかしながら、コンジット材として厚さ0.2 mmのステンレス管を選定した場合でも出口径が5.14 mmのダイスを貫通させることができず、本方式による縮径は困難であることが判明した。そこで、楕円変形を許容することとし、前年度に2組のローラーを用いて製作した導体を採用して、実験サンプルを製作することとした。図6に示すように、巻線治具実験およびねじり印加のための試料ホルダーなど、研究遂行に必要な部品は揃っており、2019年度以降も研究を継続する。

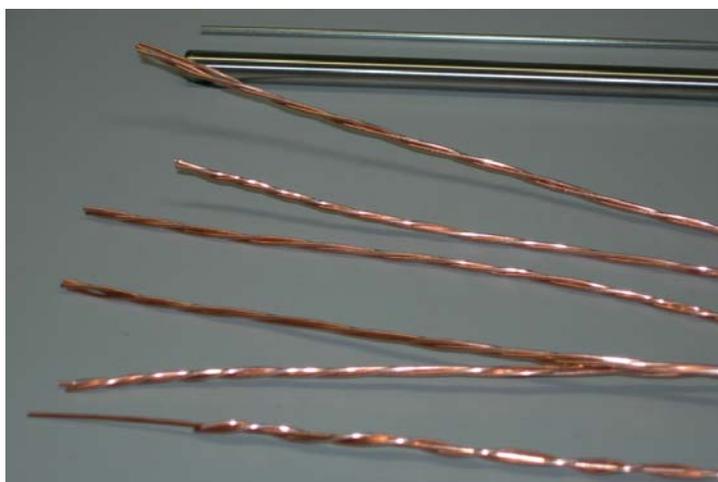


図3 外径1.6 mmのステンレス管（中心チャンネル）、外径6.0 mmのステンレス管（コンジット）および3本撚り線



図4 コンジットの多重撚り線を挿入したところ

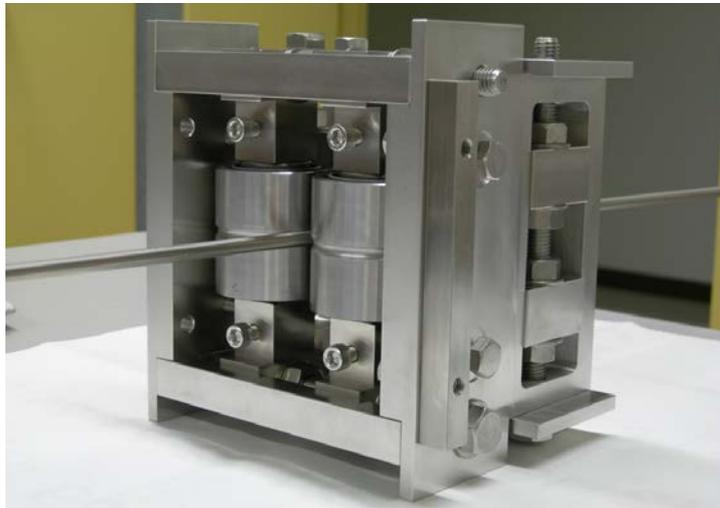


図5 導体縮径治具



図6 導体巻棒(中央)と熱処理時の外周拘束治具(左)ねじり印加のための試料ホルダー(右)

### (3) ワインド・リアクト・トランスファー法の設計検討

本研究は、円形の巻棒で熱処理を行った  $Nb_3Sn$  導体を振り変形を加えてヘリカル形状に成形するリアクト・アンド・ワインド法を想定して開始した。しかし、試験コイルの製作を通してコンジット材(ステンレス管)の塑性変形制御が容易でないことが判明したため、熱処理後にはコンジットに塑性変形を与えない、ワインド・リアクト・トランスファー法の適用可能性を検討した。本方式は、大型の熱処理炉が必要となる欠点があるが、ITERのトロイダル磁場コイルや中心ソレノイドコイルにも採用されており、要素技術は整っていると考えられる。

ここで検討する巻線方法は、図7に示すように、熱処理炉を兼ねた巻棒にCIC導体を1層ずつヘリカル形状に巻き付けてから熱処理を行い、次に、弾性変形の範囲内でコイル容器に移送(トランスファー)する方式である。レイヤー巻を想定している。この移送の際に電気絶縁テープを導体に巻き付ける空間を確保することにより、ITERと同様に有機絶縁材料を採用することが可能となる。対象とするヘリカルコイルの諸元は、主半径 16.74 m、小半径 4.017 m、中心磁場 4.90 T、導体電流 90.2 kA、コンジット外径 45.5 mm、巻数 30 列×14 層を選択した[②]。移送時にはCIC導体に主に曲げ・振りひずみが生じることから、コンジットに最大ひずみが生じる。弾性範囲は材質に依存するが、ここではITERと同じ0.2%を許容値とする。

有限要素法を用いた構造解析を行い、移送時の導体の巻棒からの浮き上がり量とコンジットに生じる相当ひずみを評価した。巻棒を2つのコイル容器の間に配置する場合は、トロイダル方向に $18^\circ$ の移送が必要となり、移送時に巻棒からフリーにする導体長を1ピッチ長とする条件での最大相当ひずみが0.2%を超えることから、巻棒をコイル容器に近付けて、移送量を

12° に減らした場合を検討した[①]。この場合、絶縁テープ巻回に必要な導体浮き上がり量を十分に確保した上で、最大ひずみを 0.15%以下に抑制できることが分かり、本方式のヘリカルコイルへの適用可能性を示すことができた。

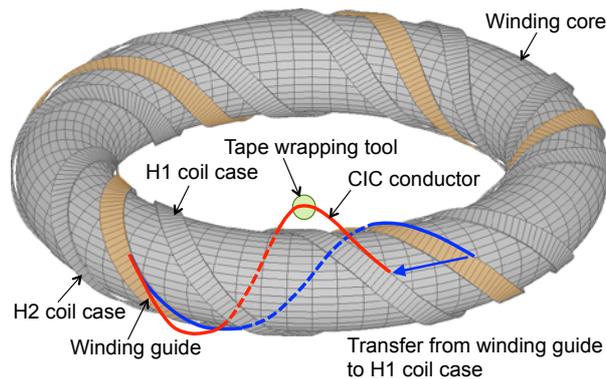


図7 ワインド・リアクト・トランスファー法によるヘリカルコイル巻線の概念

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① S. Imagawa, "Study on wind-react-transfer method for helical coils wound from Nb<sub>3</sub>Sn cable-in-conduit conductors", Plasma and Fusion Research, 査読有り, Vol. 13 (April 2018) art. no. 3405027. DOI:10.1585/pfr.13.3405027.
- ② S. Imagawa, "Feasibility Study of React-and-wind Method for Helical Coils Wound from Cable-in-conduit Conductors", Plasma and Fusion Research, 査読有り, Vol. 11 (April 2016) art. no. 2405058. DOI: 10.1585/pfr.11.2405058.

[学会発表] (計 6 件)

- ① 今川信作; Nb<sub>3</sub>Sn 導体のワインド・リアクト・トランスファー法によるヘリカルコイル巻線の概念検討, 2018 年核融合エネルギー連合講演会, 大津, June 28-29, 2018, 28P-29.
- ② S. Imagawa, "Study on wind-react-transfer method for helical coils wound from Nb<sub>3</sub>Sn cable-in-conduit conductors", ITC-26/APFA-11, Toki, Japan, Dec. 5-8, 2017, P2-89.
- ③ S. Imagawa, "Experimental study on the effect of twisting on critical currents of Nb<sub>3</sub>Sn cable-in-conduit conductors", MT-25, Amsterdam, the Nethreland, Aug. 27-Sep. 1, 2017, Tue-Af-Po2.08-08.
- ④ 今川信作; Nb<sub>3</sub>Sn 導体のリアクト・アンド・ワインド法によるヘリカルコイル巻線の概念検討, 2016 年核融合エネルギー連合講演会, 九大, June 14-15, 2016, 14P022.
- ⑤ S. Imagawa, "Feasibility Study of React-and-wind Method for Helical Coils Wound from Cable-in-conduit Conductors", ITC-25, Toki, Japan, Nov. 3-6, 2015, P1-67.
- ⑥ 今川信作; リアクト・アンド・ワインド法によるヘリカルコイル巻線の概念検討, 2015 年度秋季低温工学・超電導学会講演会, 姫路, Dec. 2-4, 2015, 3B-a08.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

## 6. 研究組織

- (1) 研究分担者 なし
- (2) 研究協力者 なし