

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 18 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23561004

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超伝導特性改善の原理実証

研究課題名(英文) Feasible study on improvement of superconducting properties of a cable-in-conduit conductor by additional twist.

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、(間接経費) 1,080,000円

研究成果の概要(和文)：直径0.9 mmの銅線を3本撚り×4×6で撚り合わせた多重撚線を長さ0.5 mで外径17 mmの配管(コンジット)に挿入する方法でケーブル・イン・コンジット模擬導体を製作した。このコンジットの片側端部を固定し、もう片方の端部に回転および長手方向の圧縮・引張荷重を印加できる拘束治具を製作し、コンジットに圧縮・引張荷重を加える場合と捩りを加える場合の2通りについて、コンジット表面のひずみと撚線のひずみの関係を調べた。その結果、撚り方向と同じ方向にコンジットを回転させると撚線に引張ひずみが生じること、および、そのひずみはコンジットの主ひずみの1/10程度に緩和されることが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：A sub-size sample of Cable-In-Conduit conductor is prepared. Six sub-cables made of 3x4 copper wires are twisted, and they are inserted into a SUS304 pipe (conduit) of the diameter of 17 mm and the length of 0.5 m. A special tool is manufactured to twist or to pull and push the conductor sample. One end of the conduit is fixed, and the opposite end is rotated or pulled with the tool. It is shown that the tensile strain is induced in the wire by twisting the conduit in the same direction to the wire twisting direction and that the strain change of wires is in the order of 1/10 of the conduit.

研究分野：超伝導工学

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：超伝導 ねじりひずみ ケーブル・イン・コンジット導体 ポイド率 ひずみゲージ

1. 研究開始当初の背景

超伝導コイルにおいては、発熱等によって一部が常伝導に転移した際には、過度の温度上昇を避けるため電流の急速遮断が必要である。その際の最大電圧によりコイルインダクタンスが制約され、磁気エネルギーの大きなコイルほど大電流導体が必要となる。核融合炉用マグネットには 50 kA を超える大電流導体が必要とされるため、大電流導体の開発が進められてきた。バンドル導体とそれを囲む金属ジャケットから構成される、ケーブル・イン・コンジット(CIC)は、超伝導素線が液体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金属ジャケ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おり、国際熱核融合実験炉 ITER 用に、最大経磁界が 12-13 T で電流値が約 70 kA の Nb₃Sn ケーブル・イン・コンジット導体が開発され、モデルコイル等によって導体性能と巻線構造の基本性能が実証された。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[1, 2]。Nb₃Sn 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℃の熱処理が必要である。生成した Nb₃Sn 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。Nb₃Sn 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課題となっている。この熱ひずみに加えて、燃られた超伝導素線同士の接触点を支点とする電磁力による曲げひずみも超伝導特性を低下させると考えられており、ITER においてはひずみ無しの理想的な臨界電流に比べると 1/3 程度まで低下した状態で使用される。ITER のトロイダル磁場コイルの設計によると、熱ひずみが-0.69%、電磁力の影響が-0.15%と見積もられており、熱ひずみが大きなウエイトを占めていることから、この圧縮荷重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。

[1] N. Mitchell, *Cryogenics*, **43** (2003) 255-270.

[2] D. Ciazynski, *Fusion Engineering and Design*, **82** (2007) 488-497.

2. 研究の目的

核融合装置用の超伝導マグネットには大電流導体が必要であるため、Nb₃Sn などの超伝導線材を多重に撚り合せたバンドル導体を金属ジャケットに収納したケーブル・イン・コンジット導体の実用化されている。本研究の目的は、このケーブル・イン・コンジット導体において、高温での生成熱処理から

の冷却過程で生じる残留圧縮ひずみをコンジットに振りを加えることにより軽減し、超伝導特性を改善する方法を原理実証することである。

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、その外側コンジットは縮径加工により超伝導撚線と密着している。そのため、超伝導素線の最終撚りの方向と同方向にコンジットを振ることによって超伝導線に引張荷重を与えることができるはずであり、このことを利用して、冷却によって超伝導線に生じる圧縮熱ひずみを緩和できると予測している。実際のケーブル・イン・コンジット導体を用いた実証実験には、液体ヘリウム中で導体に振りを加えるような大掛かりな実験装置が必要となると考えられるため、その準備研究として、本研究では、コンジットの振り角と超伝導撚線に生じるひずみの関係を明らかにする。そのため、模擬導体を用いた実験と有限要素法等を用いた解析を行い、実際のケーブル・イン・コンジット超伝導導体に最適な振り量とその方法を検討する。

中性子線を用いてケーブル・イン・コンジット導体の超伝導撚線に生じているひずみを実測する研究が日本原子力研究開発機構で進められているが、内部ひずみの測定は難しいため、超伝導特性の変化から推測して、冷却によって超伝導線に大きな圧縮ひずみが生じていると理解されている。電磁力や巻線時のひずみに関しては統一的な理解には至っていない。本研究では、コンジットに振りを加えた場合の超伝導線のひずみの変化を調べ、その因果関係を明らかにすることを目的としており、超伝導線模擬導体のひずみを直接測定する予定である。この研究によってケーブル・イン・コンジット導体内の超伝導撚線のひずみの挙動について重要な知見が得られることが期待できる。

ケーブル・イン・コンジット導体は、その優れた冷却安定性と機械強度から、核融合実験装置だけでなく、強磁場コイルにも適用されるようになっている。ジャケット材に Incoloy 908 や Ti のように線膨張係数の小さい金属を採用することにより冷却による熱ひずみを小さくできることは、既に実証されているが、これらの合金は高価である他、Incoloy 908 には熱処理時の雰囲気条件の管理が難しいことや熱処理後の溶接が困難などの課題があり、Ti には機械強度が小さいという欠点があり、結局、ITER にはステンレス鋼が採用された。そのために理想的な臨界電流の 1/3 程度で使用するという設計になっている。本研究により、コンジットの振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、熱処理後に導体に必要な

振り加工を加える具体策の検討が必要ではあるが、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。

3. 研究の方法

まず、超伝導線を模擬する線材の材質を検討した。超伝導燃線の局所ひずみの測定にはひずみゲージを使用するが、燃線への影響を小さくするために測定点数を数箇所に限定する必要がある。そのため、ひずみによって電気抵抗が変化することを利用して各超伝導線の平均ひずみを求める方法を検討した。機械特性が超伝導線に近いことも重要なので、数種類の抵抗線を比較した結果、ホルマール絶縁マンガニン線を候補として選定し、ひずみに対する抵抗変化を定量的に評価した。その結果、単線ではひずみ計測器に適合する抵抗値を確保できないことが分かり、極細線の撚り線方式を考案するとともにその他の線材には銅裸線を採用することとした。

次に、選定したホルマール絶縁の模擬線材と銅裸線を用いて、図1に示すようなケーブル・イン・コンジット模擬導体を製作した。2本の銅線の中央付近にひずみゲージを貼り付けた。線材の直径は実機導体と同等の1 mm程度とし、中心には冷却チャンネルを模擬して直径6 mmのステンレス配管を配置し、その回りに3本撚り×4の撚線6セットを0.2 m程度のピッチで巻き付けてコンジットに挿入した。コンジット材にはステンレス配管を使用し、撚線挿入後に40%以下のボイド率（断面内の空隙の割合）となるように外部から加圧して縮径することを検討したが、特殊な加工設備を必要とすることから予算内で実施可能な外注先を見つけることができなかったため、押し込み可能なボイド率を試行錯誤で決定した。コンジット端部には振り荷重を加えるためのフランジを取り付け、コンジットと撚線が長さ方向に滑らないように、端部は撚線を樹脂で埋めてジャケットに固定した。

この模擬導体のコンジット端部フランジの片端を固定し、もう片方のフランジに回転および長手方向の圧縮・引張荷重を制御できるような拘束治具を設計した。まず、コンジット長手方向に弾性範囲内で圧縮と引張荷重を加え、その際のひずみゲージと撚線抵抗値の変化を調べることで、端部で撚線がコンジットにしっかりと固定されていることとひずみゲージや撚線抵抗計測の健全性を確認した。続いて、コンジット端部フランジの片側を回転させることによりコンジットを振り、その際のひずみゲージと各撚線の抵抗値の変化を測定し、回転角度と撚線に生じるひずみの関係を調べた。

実験と並行して、構造解析モデルを検討し

た。さらに、この研究成果を実際のケーブル・イン・コンジット導体へ適用する方法について、コイル巻線方法と合わせて検討した。

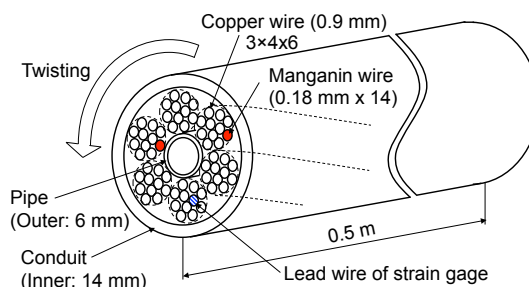


図1 CIC 導体サンプルの概念図

4. 研究成果

(1) 超伝導線模擬線材の選定

超伝導線を模擬する線材を検討した。ひずみによって電気抵抗が変化することを利用して各模擬線材の平均ひずみを求めるため、銅合金系の中では高い抵抗率を有するホルマール絶縁マンガニン線を第1候補として、数種類の抵抗線を比較して最適な模擬線材を検討した。マンガニン線よりも3倍程度の抵抗率を有するニクロム線や鉄クロム線も候補として、機械特性を整理した。検討の結果、機械的特性が銅に近い方が望ましいと判断して、銅合金系の中では高い抵抗率を有するホルマール絶縁マンガニン線を選択した。

既設のひずみ計測器を利用するためには、各々の抵抗値を120Ω以上とすることが求められており、長さ1 mのマンガニン線の場合に120Ω以上の抵抗値を得るためには直径0.07 mm以下の細い線材を使うことが必要となる。そのため、抵抗値が1Ω程度と小さい場合のひずみ計測の可能性を調べた。検討の結果、汎用アンブと計測システムの組合せでは、標準的なひずみ計測器の測定感度を上回ることは困難であると判断し、120Ω以上の抵抗値となるような模擬線材を検討した。その検討において、細いマンガニン線を折り返して束ねることにより120Ω以上の抵抗値を得る方式を提案した。束ねた直径が超伝導線材の直径と同じ1 mm程度となるように、線径0.18 mm（ホルマール絶縁線径0.211 mm）のマンガニン線を折り返して14本束ねる構造とし、120Ωを確保するため模擬導体の長さを0.5 mとした。

(2) 振り治具の設計

試験治具については、模擬導体のコンジット端部フランジの片端を固定し、もう片方のフランジに回転および長手方向の圧縮・引張荷重を制御できるような拘束治具の設計し、製作を外注した。断面図を図2に示し、外觀図を図3に示す。回転機構にはウォームギアとウォームホイールを採用し、長手方向の圧

縮・引張ひずみを開放するため、キーとキー溝によるスライド機構を設ける設計とした。想定している模擬導体のコンジットには JIS ステンレス 10A 配管を予定しており、Sch40 (板厚 2.3 mm) と Sch10S (板厚 1.65 mm) の振りトルクは、各々、50.4 と 40.6 N・m/rad であるので、許容歯面強さが 100 N・m 以上のウォームホイールを選択した。また、模擬導体の片側の回転と長手方向変位を拘束する外円筒には、模擬导体よりも振り剛性が 1,000 倍以上高い 150A-Sch10S のステンレス配管 (振りトルク 91,399 N・m/rad) を選択した。

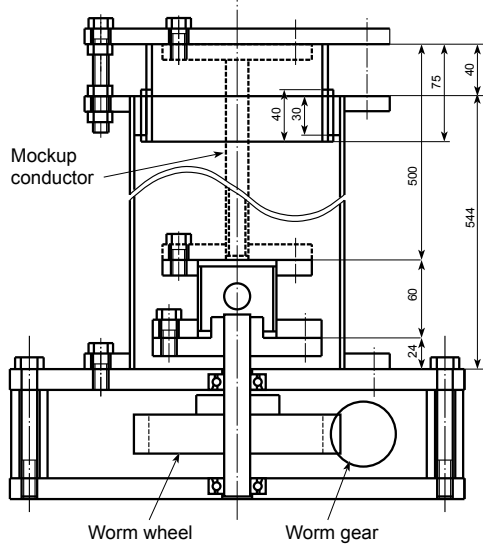


図2 导体振り治具



図3 振り治具の外観図

(3) 模擬導体の製作

まず、線径 0.18 mm (絶縁後 0.211 mm) のホルマール絶縁マンガン線線を長さ 0.5 m で折り返して 14 本束ねることにより、束ねた

直径が超伝導素線の直径と同じ 1 mm 程度であり、かつ、120Ω 程度の抵抗値となる模擬線材を 5 本作成した。この模擬線材 1 本と直径 1 mm の銅線 2 本を 30 mm 程度 (平均 33.4 mm) の撚りピッチで撚り合わせて、図 4 に示す一次撚線を 2 束作成した。次に、図 5 のように、中央に長手方向の一軸ひずみゲージを貼り付けた銅裸線 2 本とひずみゲージの計測線を撚り合わせて、図 6 に示す一次撚線を 1 束作成した。残りの一次撚線には全て銅裸線を使用し、50 mm 程度 (平均 50.4 mm) のピッチで 3 本撚り×4 の二次撚線 6 束を作成した。図 7 に、一次撚線と二次撚線の全景を示す。模擬導体の中心に冷却チャンネルを模擬する直径 6 mm のステンレス配管を配置し、その回りに二次撚線 6 束を 0.15 m 程度 (平均 0.13 m) のピッチで巻き付けて、図 8 に示すような三次撚線を作成した。次に、上記と同じ要領で、銅裸線の直径を 0.9 mm に変更した三次撚線を作成した。

コンジットには 10A-Sch40 と 10A-Sch10S の 2 種類のステンレス配管を用意し、各々、超伝導線を模擬する線径 0.90 mm と 1.00 mm の銅線を用いた三次撚線を 40% 以下のボイド率 (断面内の空隙の割合) となるように挿入する計画であったが、撚り作業によって外径が拡大してしまったため、この組合せでは三次撚線をコンジットに挿入することができなかった。そこで、ボイド率が 50% に拡大することを許容して、線径 0.90 mm の銅線で作成した三次撚線を Sch10S 配管に挿入して、一本の模擬導体を製作した。コンジット端部には振り荷重を加えるためのフランジを取り付け、また、コンジットと撚線が長さ方向に滑らないように、図 9 に示すように、端部は撚線を樹脂で埋めてジャケットに固定した。コンジット中央の 2 箇所に、図 10 に示すように 3 軸ひずみゲージを貼り付けた。



図4 一次撚線 (マンガン線 1 と銅線 2)



図5 銅線に取り付けたひずみゲージ



図6 一次撚線（ひずみゲージリード線1と銅線2）

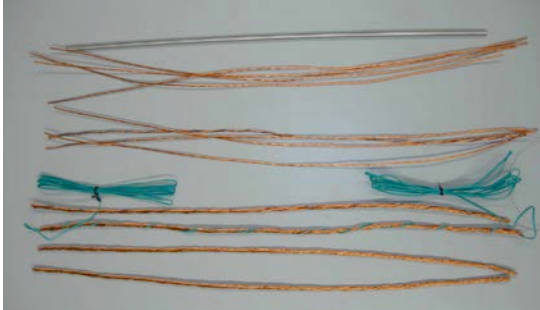


図7 一次撚線（上部）と二次撚線（下部）



図8 三次撚線

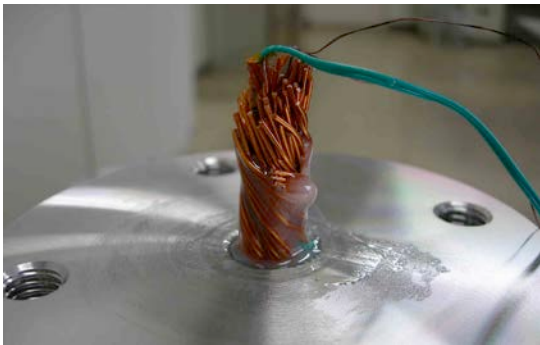


図9 模擬導体の端部（模擬撚り線の端部を樹脂で固定）

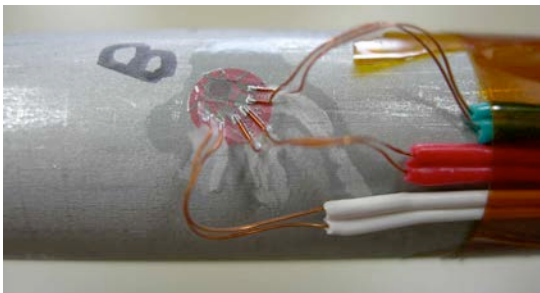


図10 模擬導体のコンジットに貼り付けた3軸ひずみゲージ

(4) 撚り試験の結果

上記の方法で製作した模擬ケーブル・イ

ン・コンジット導体を撚り治具に取り付けて、コンジット長手方向に弾性範囲内で圧縮と引張荷重を加える場合と、コンジット端部フランジの片側を回転させることによりコンジットに撚りを加える場合の2通りについて、ひずみゲージと撚線抵抗値の変化を調べた。図11に撚り治具の外円筒を取り付ける前の写真を示す。模擬導体の上端が外円筒に固定されており、ウォームギアを手動で回すことにより、模擬導体の下端を回転させることができる。撚り治具上部のボルト・ナットの調整により長手方向の引張・圧縮を変えることができる。

模擬導体を左右方向に3/4回転させた場合のコンジット表面のひずみ変化を図12に示す。コンジットには純せん断に近いひずみが生じていることが分かる。図13に撚線の長手方向ひずみを示す。撚り方向と同じ方向にコンジットを回転させると撚線に引張ひずみが生じ、そのひずみはコンジットの主ひずみの1/10程度に緩和される結果が得られた。引張においても主ひずみに対して同程度に緩和されることから、ポイド率が大きく線材の拘束が弱いことがひずみの緩和に影響している可能性もあり、今後、ポイド率の小さな導体の実験が必要である。また、マンガン線の抵抗値変化については、有意な変化が観測されず、端部の固定不良など、原因調査が必要である。

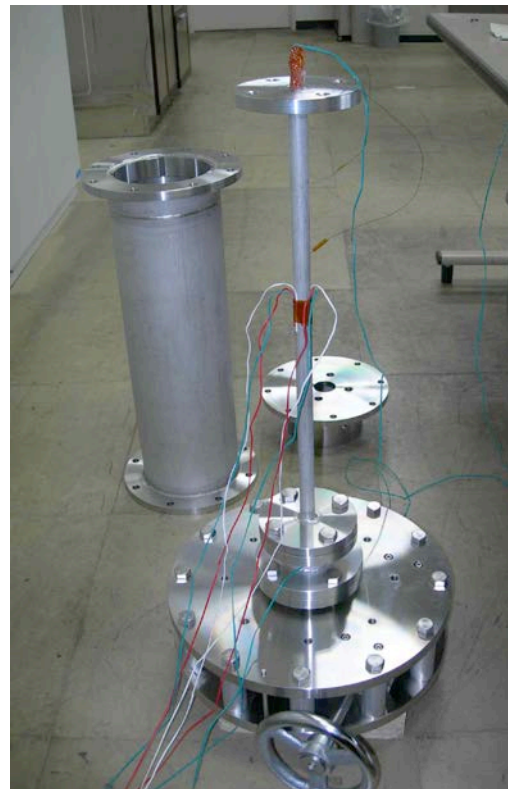


図11 模擬導体を撚り治具に取り付けた状態（外円筒の取付前）

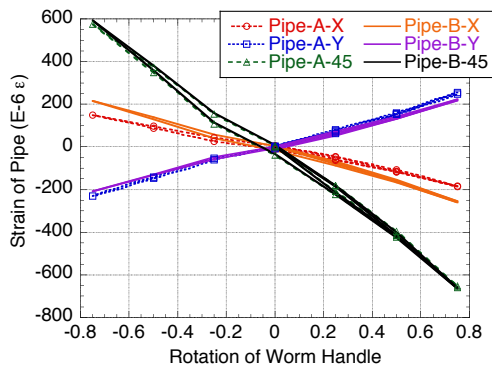


図 12 模擬導体を左右に 3/4 回転させた場合のコンジット表面の 2 つ (A, B) の 3 軸ひずみゲージの出力。X はコンジット長手方向, Y は周方向, 45 は X に対して 45 度方向のひずみ成分を示す。

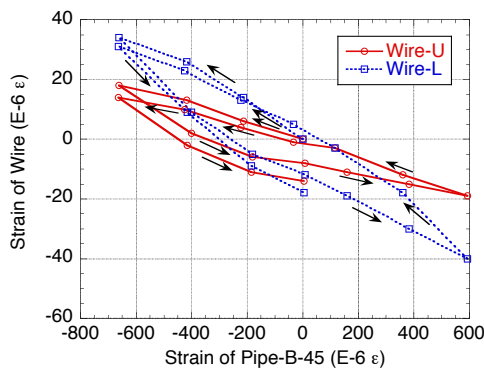


図 13 模擬導体を左右に 3/4 回転させた場合のコンジット表面のせん断ひずみに対する撚線の長手方向ひずみ。U と L は、1 束の一次撚線の 2 本の銅線に貼り付けた一軸ひずみゲージ (図 6 参照) の区別。

(5) まとめ

冷却チャンネルを模擬する直径 6 mm のステンレス管を中心に配置し、その回りに 3 本撚り×4 の二次撚線 6 束を 0.15 m 程度のピッチで巻き付けてコンジットに挿入する方法でケーブル・イン・コンジット模擬導体を製作した。並行して、この模擬導体のコンジット端部フランジの片端を固定し、もう片方のフランジに回転および長手方向の圧縮・引張荷重を制御できるような拘束治具を製作し、コンジット長手方向に弾性範囲内で圧縮と引張荷重を加える場合と、コンジット端部フランジの片側を回転させることによりコンジットに振りを加える場合の 2 通りについて、コンジットと撚り線のひずみの変化を調べた。その結果、撚り方向と同じ方向にコンジットを回転させると撚線に引張ひずみが生じること、および、そのひずみはコンジットの主ひずみの 1/10 程度に緩和されることが明らかになった。超伝導生成熱処理で生じる残留圧縮ひずみをコンジットに振りを

加えることにより軽減し、超伝導特性が改善される可能性を示す結果が得られた。

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 2 件)

① T. Obana, K. Takahata, S. Hamaguchi, T. Mito, S. Imagawa, K. Kizu, H. Murakami, and K. Yoshida, "Joint resistance measurement of pancake and terminal joints for JT-60SA EF coils", Fusion Engineering and Design, 査読有, Vol. 888 (2013) 2773-2776.

② K. Takahata, H. Tamura, T. Mito, S. Imagawa, and A. Sagara, "Effect of bending on critical current and n-value of react-and-jacket processed Nb₃Sn conductor", Plasma and Fusion Research, 査読有, Vol. 8 (2013) 2405008.

[学会発表] (計 1 件)

① S. Imagawa, "Experimental study on stress change of wires in a cable-in-conduit conductor by being twisted," 23rd International TOKI Conference, Toki, GIFU, Japan, Nov. 18-21, 2013, P1-66.

6. 研究組織

(1) 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：1 0 2 3 2 6 0 4