

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 9 月 1 日現在

機関番号：33907

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420856

研究課題名(和文) セラミックスコーティングを用いた核融合炉用先進的超伝導線材の開発と評価

研究課題名(英文) Development of practical Nb3Sn superconducting wire using Ceramic Coatings for Nuclear Fusion reactor

研究代表者

町屋 修太郎 (SHUTARO, Machiya)

大同大学・工学部・准教授

研究者番号：40377841

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：ITER計画でも用いられている実用超伝導線材であるNb3Sn超伝導線材は、主に研究用の高磁場領域のアプリケーションで用いられている。超伝導線材は、主に複合材の形をとり、特にNb3Snは銅やブロンズの割合が大きく、弾性域が小さく強度が確保できない問題がある。今後の核融合や素粒子研究などへの応用を考えると、さらなる高強度化と高性能化が求められている。そこで、本研究では、CrNを表面にコーティングすることで、残留応力のコントロールと高強度化を試み良好な結果を得た。また、フィラメント部について、世界で初めてX線応力測定も行うことに成功し、簡易的な残留応力測定法を確立することができた。

研究成果の概要(英文)：In general, the mechanical strength of practical Nb3Sn wires is weak because of its annealed Cu ratio. There is a need to strengthen the wire further for employing nuclear fusion application and nuclear particle physics. In order to reinforce practical Nb3Sn wires, we proposed a coating technique of CrN layer on the wire surface. CrN has high Young's modulus and low CTE and so the CrN coatings can improve the strength and thermal stress. In order to evaluate residual stress in the Nb3Sn wires coated by CrN thin layer, we applied X-ray stress measurement method using the laboratory X-ray apparatus. We will report about the stress/strain behavior, and the residual stress introduced in Nb3Sn filaments.

研究分野：機械工学

キーワード：残留ひずみ 残留応力 複合材 応力測定 ひずみ測定 超伝導

1. 研究開始当初の背景

ITER 計画でも用いられている実用超電導線材である Nb₃Sn 超電導線材は、主に研究用の高磁場領域のアプリケーションで用いられている。超電導線材は、主に複合材の形をとり、特に Nb₃Sn は銅やブロンズの割合が大きく、弾性域が小さく強度が確保できない問題がある。

今後の核融合や素粒子研究などへの応用を考えると、さらなる高強度化と高性能化が求められている。

2. 研究の目的

本研究では、CrN を表面にコーティングすることで、残留応力のコントロールと高強度化を試みた。また、これまでは、フィラメント部の残留ひずみを測定するために、中性子回折法あるいは、高エネルギー X 線回折法が用いられていたが、中性子は回折は、国内では 1 カ所でのみ実験ができず、高エネルギー回折も SPRING-8 でしか実施できないため、簡便な評価法が求められていた。そこで、本研究では、フィラメント部について、研究室 X 線を用いての応力測定手法の開発も行った。

3. 研究の方法

まず、試験片について説明する。試験片は、日立電線製の ITER CS コイル用超電導線材である。線径は、約 0.81 mm である。断面の研磨写真を図 1 に示す。各フィラメントの直径は約 1 μm である。フィラメントは、線材中の約 10% しかなく、残りは、純銅およびブロンズであり、少量であるが、外層の安定化銅と内層のブロンズの間にはバリア層として、Nb も存在する。このため、構造的に引張強度は低い。

この線材の円筒表面に、Cr メッキ膜 7 μm をあらかじめ施したものを準備した。は、約 650 の熱処理によって熱拡散により生成させるが、準備段階では、非熱処理のものを準備している。CrN を生成させるために、熱処理と CrN 生成を同時に行う手法をとった。アンモニアガス中で熱処理を行い、熱処理時間は 650、約 120 時間である。X 線応力測定用の試験片は、エポキシ樹脂に埋め込み、研磨を行い、最終的にパフ研磨にて 10 μm 程度を除去し、鏡面になった面で測定を行うこととした。

次に実験方法について説明する。X 線応力測定について、測定条件を表 1 にまとめた。

特性 X 線は Cu-K を用いて、単独ピークで応力測定に十分な強度を持つ面として、Nb₃Sn の 532 面を選択した。Nb₃Sn は立方晶であるが、A-15 構造を

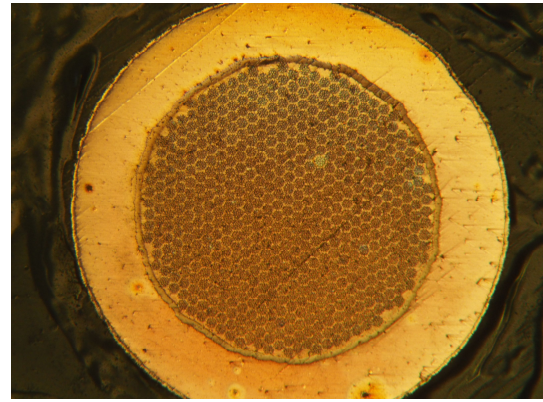


図 1 Cross section image of Nb₃Sn wire

とるため、高次の回折面を得やすい。しかし、回折強度は、極めて弱く、6 本に試験片を 12 回測定を積算することでプロファイル取得に十分な時間をとっている。

引張試験について説明する。両端をエポキシを FRP のタブに接着することで、チャック部の塑性変形を防止している。引張試験方法は、IEC の測定標準に従って行った。

Table 1 X-ray conditions

Characteristic X-ray	Cu-K α
Scan axes	2 θ / ω
Scan method	Continuous
Sampling width	0.02 [°]
Scan speed	0.5000 [°/min]
Summing number	12
Scan degree	125.5 [°]
	130 [°]
Voltage	50 [kV]
Current	300 [mA]
Mirror index	5 3 2

4. 研究成果

まず、引張試験結果について、説明する。元々、線材は、熱処理の時の線膨張係数のミスマッチのために、線膨張係数が大きい銅部分に引張、セラミックス系で線膨張係数が小さい超電導フィラメント部に圧縮の残留応力を有しており、室温付近においては、純銅が、引張残留応力から部分的に降伏が既に始まっている。

引張試験によって得られた応力ひずみ線図を図2に示す。よって、図に示すように弾性部分が明確でない。ひずみ0.1%程度の引張後に0.05%まで除荷することで、直線部が得られるため、除荷時のヤング率も求めている(IECの機械的性質評価基準に準拠)。得られたヤング率は、コーティング有の場合は、95.3 GPaとなり、ない場合の89.5 GPaよりも向上しているのがわかる。0.2%耐力においても、134 MPaと、ない場合の119 MPaよりも大幅に改善している。わずかの厚さのコーティングにより機械的性質は大幅に改善できている。

次に、X線応力測定について説明する。図3にX線プロファイルを示す。応力定数は、Nb₃Sn単結晶のコンプライアンスからクレナーモデルにより、回折男性定数を算出した。 \sin^2 法で応力を求めた結果、CrNコーティングありの試験片で-164 MPa、比較のために測定したCrNコーティングなしの試験片で-134 MPaであった。定性的に、CrNはセラミックスであり、線膨張係数が小さくヤング率が大きい。Nb₃Snに線膨張係数が近いCrNをコートすれば、定性的には、Nb₃Snの圧縮残留応力は軽減されると思われたが結果は逆に圧縮残留応力が増加した。線膨張係数の測定も行ったが、CrNをコートしたものは、線膨張係数が低下しており、これも予測通りである。これは、もともと、銅部分が室温では部分降伏しているが、線材が外側から強化されたため、銅部分の耐力が向上し、受け持てる内力が増加したためと考えられる。

総括すると、核融合炉用のNb₃Sn超電導線材にアンモニア窒化によるCrNコーティングを7 μm施すことで、線材の強化を試みた結果、ヤング率は、6.5%向上し、0.2%耐力は12.3%向上した。残留応力は、やや上昇する傾向がみられたが、これは耐力が向上したことで、銅とブロンズ部が受け持てる内力が増えたためだと考えられる。

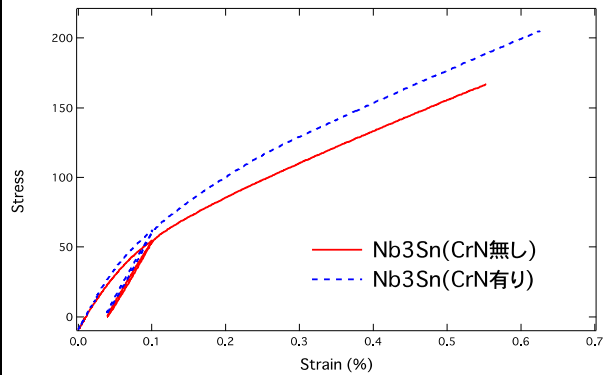


図2 Stress-Strain curve of Nb₃Sn wire

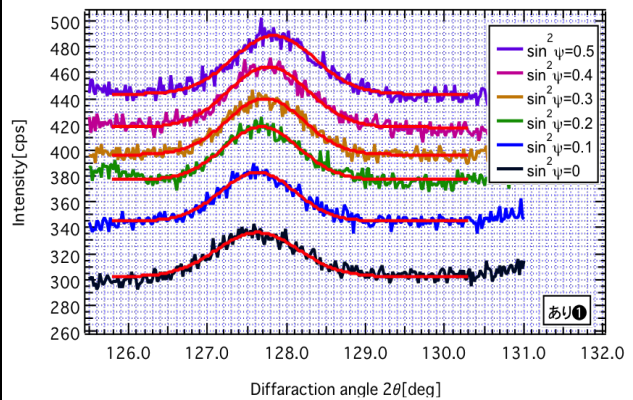


図3 Diffraction profile of Nb₃Sn 532 (\sin^2 method)

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 0件)

〔学会発表〕(計 2件)

1.

町屋修太郎、長村光造、長江正寛、浅井達也、加納 涉吾、実用 Nb₃Sn 超電導フィラメントの X 線応力測定、日本材料学会、第 67 期通常総会・学術講演会、名古屋、2017 年

2.

S. Machiya, K. Osamura, G. Nishijima, X-ray stress measurement of CrN Coated practical Nb₃Sn Superconducting wire, 13th biennial European conference on applied Superconductivity, Geneve, 2017 年

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況（計 0 件）

図 2

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

出願年月日：

国内外の別：

取得状況（計 0 件）

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

取得年月日：

国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

町屋 修太郎 (MACHIYA, Shutaro)

大同大学 工学部 機械工学科

准教授

研究者番号：40377841

(2) 研究分担者

長村 光造 (OSAMURA, kozo)

応用科学研究所 理事

研究者番号：50026209

(3) 連携研究者

西島 元 (NISHIJIMA, Gen)

物質・材料研究機構 研究員

研究者番号：30333884

(4) 研究協力者

()