

令和 2 年 9 月 8 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H04621

研究課題名(和文) 固溶強化Cu-Snマトリックスを用いた核融合用高強度Nb₃Sn超伝導線材の開発研究課題名(英文) Development of high strength Nb₃Sn superconducting wire for nuclear fusion using solid solution strengthened Cu-Sn matrix

研究代表者

菱沼 良光 (HISHINUMA, Yoshimitsu)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授

研究者番号：00322529

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,400,000円

研究成果の概要(和文)：核融合原型炉応用に向けた超伝導マグネットの「高電流・高電磁力化」の設計要求に対して、巨大な熱的・機械的応力や歪み印加に耐え得る高強度Nb₃Sn線材開発を実施した。我々は既存概念でない「Cu合金の相変態論に基づく内部マトリックス強化」という新しい概念の高強度ブロンズ法Nb₃Sn線材を提案し、Cu-Sn-In及びCu-Sn-Zn三元系合金を母材とした内部強化ブロンズ法Nb₃Sn線材を実証した。内部強化ブロンズ法Nb₃Sn線材の臨界電流特性における引張応力・歪み印加依存性はこれまでに最高の高強度を示したCuNb合金補強線材よりも改善され、高強度Nb₃Sn線材の新しい可能性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

世界的に見ても例がない線材構成である三元系ブロンズ合金を用いた内部マトリックス補強Nb₃Sn線材を実験的に示し、新しい高強度Nb₃Sn線材を実証した。この内部マトリックス強化は、Nb₃Sn線材の最大の弱点である機械特性の改善に対して直接的に寄与する手法であり、高磁場・高電磁力が想定される核融合原型炉への適用も可能な新しいNb₃Sn線材と考えられ、大変意義深い成果が得られた。

また、本研究成果は、核融合工学の進展だけでなく、高強度Nb₃Sn線材を要する超大型強磁場マグネットを必要とする大型加速器科学や重粒子線医療にも大きく貢献する可能性がある。

研究成果の概要(英文)：We have developed a high mechanical strength Nb₃Sn multifilamentary wire that can withstand huge thermal and mechanical stress and strain in response to the design requirements for "high current and high electromagnetic force" of the superconducting magnets for a DEMO applications. We proposed a high mechanical strength bronze processed Nb₃Sn wire with a new concept called "internal matrix strengthening (solid solution strengthening) based on phase transformation theory of Cu system binary alloy". We developed to the new Cu-Sn-In and Cu-Sn-Zn ternary alloys as bronze matrix materials, and demonstrated the internal matrix strength Nb₃Sn multifilamentary wire using ternary bronze alloy matrix.

The tensile stress/strain dependence on the critical current property of the internal matrix strength Nb₃Sn wires was improved compared to the CuNb alloy reinforced wire. We proved a new possibility of high strength Nb₃Sn wire using internal matrix strengthening (solid solution strengthening).

研究分野：核融合工学、超伝導材料工学、金属材料工学

キーワード：核融合 Nb₃Sn線材 高強度化 固溶強化 臨界電流密度 応力・歪み効果

1. 研究開始当初の背景

国際熱核融合実験炉(ITER)建設に並行して各国で原型炉設計が盛んに議論されている。原型炉で使用される超伝導マグネットの「高電流・高電磁力化」が検討されており、高電流・高電磁力による機械歪に耐え得る高強度 Nb₃Sn 線材の開発は急務である。これまでに、線材断面中央に Ta 芯を複合化する方法、及び線材外側に CuNb 合金を複合化する方法等が検討され、それぞれ高強度化に成功した事例がある。しかしながら、これらの手法における共通課題は Ta や CuNb 等の非超伝導材料を複合化することで線材断面における非超伝導領域が増加し、実効的な臨界電流密度特性 (Engineering Jc: J_e) が大幅に低下することである。実効的な臨界電流特性の低下は、超伝導線材の太線径化を招き、ひいては核融合大型超伝導マグネットの成立性に大きな影響を及ぼす。このように、Nb₃Sn 線材の高強度化に対してこれまでとは違ったコンセプトが必要であった。

2. 研究の目的

これまでの外部補強による高強度 Nb₃Sn 線材という既存の概念ではなく、「Cu 合金の相変態論に基づく内部マトリックス強化 (固溶強化機構)」という新しい概念の高強度ブロンズ法 Nb₃Sn 線材を提案し、Nb₃Sn 線材の超伝導特性を低下させず、機械強度を向上させるような画期的な線材構成・線材化プロセスの最適化を行いながら、固溶強化マトリックス高強度 Nb₃Sn 線材の実現を目指すことを目的とした。

3. 研究の方法

(1) Cu 合金の相変態論に基づく内部マトリックス強化の概念

一般的にブロンズ法 Nb₃Sn 線材は Cu-Sn (ブロンズ) 二元系母材に Nb 芯を複合した部材を線材加工し、Nb と Sn の拡散反応にて Nb/Cu-Sn 界面に Nb₃Sn 相が生成している。Nb₃Sn 相の拡散生成には、Cu-Sn 母材中の Sn 全量が Nb と反応するため、Nb₃Sn 相の生成後には母材は Cu-Sn 合金から Cu に相変態している。このように、従来のブロンズ法では機械的に硬くて脆い特性を有する Nb₃Sn 相は機械的に非常に軟らかい Cu に囲まれて保護される構成になる。つまり、ブロンズ法 Nb₃Sn 線材では、線材に印加された応力やひずみは Nb₃Sn 相に集中することが考えられる。そこで、我々が提案する Cu 合金の固溶強化機構を用いた内部マトリックス強化では機械的に高強度の Cu 合金が Nb₃Sn 相を囲むように生成し、その Nb₃Sn 相拡散生成後の Cu 合金マトリックスが機械的・熱的応力や歪みの印加から Nb₃Sn 相を保護するという概念である。本研究では、固溶強化機構の作用が期待できる Cu-Sn-X 三元系ブロンズ母材に Nb 芯を複合し、Nb₃Sn 相の拡散生成後には母材が Cu-X 固溶強化合金に相変態することで超伝導特性を低下させずに線材の高強度化を図るものである。

(2) 試料作製及び実験方法

本研究では Cu-Sn-Zn 及び Cu-Sn-In 三元系合金を用意した。また、これらの合金には Ti も添加した。一般的に Ti 添加は Nb₃Sn 相の高磁場での臨界電流特性を大幅に改善する効果があり、実用ブロンズ法 Nb₃Sn 線材には必須添加物である。種々の組成にて Cu-Sn-Zn-(Ti) 及び Cu-Sn-In-(Ti) 合金塊は、水田式溶湯法にて溶製した。用意した三元系合金の初期組成を Table.1 に示す。また、比較用として、市販されているブロンズ法 Nb₃Sn 線材で用いられる通常の Cu-16wt%Sn-0.3wt%Ti 合金も用意した。三元系合金中の各元素質量は、誘導結合プラズマ発光分光分析装置 (ICP-MS) にて明らかにした。Table.1 に示した各種三元系合金塊

Table.1 本研究における各種三元系合金の初期組成とサンプルコード

| Nominal comp. (wt%) | Cu (wt%) | Sn (wt%) | X (wt%) | Ti (wt%) | Sample code |
|---------------------|----------|----------|---------|----------|-------------|
| Cu-10Sn-10Zn-0.3Ti | Bal. | 9.73 | 10.00 | 0.30 | 10Zn |
| Cu-10Sn-5In-0.3Ti | Bal. | 10.17 | 5.06 | 0.31 | 5.0In |
| Cu-14Sn-2In-0.3Ti | Bal. | 14.05 | 1.99 | 0.35 | 2.0In |
| Cu-16Sn-0.3Ti | Bal. | 16.00 | ----- | 0.30 | 16Sn |

をマトリックス材とするブロンズ法にて Nb_3Sn 極細多芯前駆体線材を作製した。なお、通常のブロンズ合金試料については、ITER で供された市販のブロンズ法 Nb_3Sn 線材を代用した。各種三元系合金材に 19 本の Nb 棒を組み込んだ 1 次ピレットを製造し、通常の熱間押出加工とダイス引抜加工を經由して 1 次サブエレメントを用意した。その後、409 本の 1 次サブエレメントを無酸素銅管に組み込んだ 2 次ピレットを作製した。その際、無酸素銅との拡散反応を抑制するためのバリア材を Nb 箔とした。2 次ピレットを通常の熱間押出加工を經由し、最終線径である 0.9mm まで通常のダイス引抜加工を繰り返した。また、ダイス引抜加工工程中には中間焼鈍処理を適当に加えることで、断線は一切確認されなかった。これにより、三元系合金材を用いた Nb_3Sn 線材にて実用に耐え得る加工性が明らかになった。このように、作製した極細多芯前駆体線材を熱処理することで Nb_3Sn 相を生成させた。

微細組織観察は、FE-SEM 及び FE-EPMA を用いて行った。また、生成相の質量分析や元素分布分析はシリコンドリフト検出器を有する EDX を用いた。マトリックス領域の相変態を確認するために、微小領域の X 線回折が可能な X 線回折装置 ($d=100\ \mu\text{m}$) を用いた。

各種極細多芯線材の超伝導特性は、4.2K において 18T までの高磁場下での J_c 特性にて評価した。 J_c 特性は、直流四端子法を用いて 8T から 18T までの磁場中にて臨界電流 (I_c) を測定し、 I_c 値を線材断面積で除した値とした。また、 I_c 基準を $1\ \mu\text{V}/\text{cm}$ の電圧が発生した時の電流値とした。なお、本研究の J_c 特性は、線材外層の安定化銅を省いた断面積で除して算出された non-Cu J_c とした。

各種極細多芯線材の臨界電流特性における引張歪み及び応力依存性を評価するために、東北大金研の低温強磁場中引張試験装置を用いた。引張試験装置を 18T 超伝導マグネットに挿入することで、液体ヘリウム (4.2K) 中で引張応力及び歪みを印加しながら I_c 測定を行った。引張歪み量は、ひずみゲージを用いて測定し、線材のたわみ成分を除去するために線材の上下面対称に貼り、引張歪み量は 2 つのゲージの平均値とした。引張応力は、低温強磁場中引張試験装置のロードセルに指示された荷重を線材全断面積で除した値とした。

4. 研究成果

【三元系 Cu-Sn 合金をマトリックス材とした Nb_3Sn 線材の微細組織】

Fig.1 に 10Zn 線材試料の断面における元素分布を示す。Cu-Sn-Zn 三元系合金を母材として適用しても、通常のブロンズ法と同様 Nb ファイラメントの周囲に均質な Nb_3Sn 相が生成し、三元系 Cu-Sn 合金は Nb_3Sn 相の生成を阻害しないことが明らかになった。さらに、Cu-Sn-Zn 三元系合金中の Zn は Nb_3Sn 相中には存在せずにマトリックス中に組成的に減少することなく、均質に残存していることが分かった。これらの事は、Cu-Sn-In 系合金でも同様に確認された。このように、本研究で開発した Cu-Sn-Zn 及び Cu-Sn-In 三元系合金はブロンズ

法の母材として適用しても問題ないと考えられる。

微小領域 XRD 装置を用いて、 Nb_3Sn 相生成熟処理後の母材における組織変化を明らかにした。Fig.2 に Nb_3Sn 相生成熟処理後におけるマトリックス領域の XRD 回折パターンを示す。通常のプロンズ法では、Cu-Sn 合金から純銅に相変態していることが明らかになった。一方、10Zn 及び 5.0In 試料では、Cu(200)の回折ピークが純銅よりも低角度側にシフトし、加えて 5.0In 試料では 10Zn 試料と比較してより低角度側にシフトした。一般的に、低角度側への回折ピークシフトはブラッグ条件から格子定数の増加が示唆される。また、Zn や In 元素を Cu に添加し固溶体を形成すると、格子定数が Cu よりも大きくなることが知られている。これらのことから、三元系合金中の Zn や In 元素は、 Nb_3Sn 相生成後にはマトリックスにおける固溶体形成の溶質元素として作用していることが明らかとなった。Cu-Sn-Zn 及び Cu-Sn-In 三元系合金から相変態した (Cu, Zn) 及び (Cu, In) 固溶体のピッカース硬度は純銅よりも 30%程度に高くなっていた。つまり、 Nb_3Sn 相の生成熟処理による相変態にて形成した (Cu, Zn) 及び (Cu, In) 固溶体は線材の機械強度を向上させるだけでなく、 Nb_3Sn 相を囲むように生成していることから Nb_3Sn 相の保護層として作用すると考えらえる。

Cu-10.0Sn-10.0Zn-0.3Ti/Nb 7771F (10Zn)

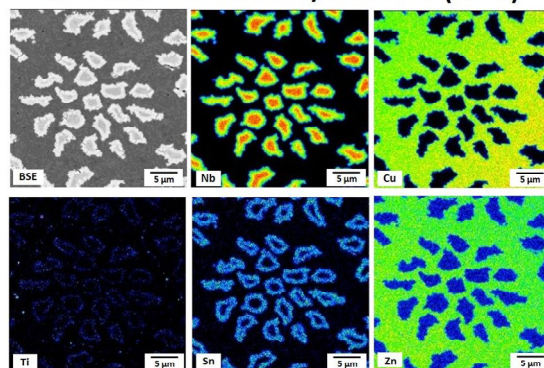


Fig.1 10Zn 線材試料の断面における FE-EPMA による元素分布

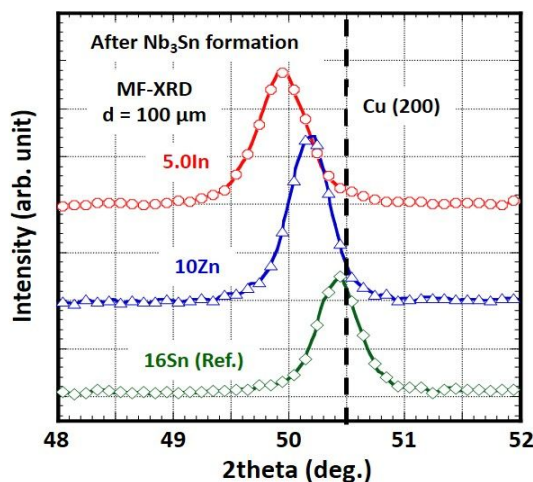


Fig.2 Nb_3Sn 相生成熟処理後におけるマトリックス領域の XRD 回折パターン

【三元系 Cu-Sn 合金をマトリックス材とした Nb_3Sn 線材の J_c 特性における高磁界特性】

Fig.3 に 200 時間熱処理された三元系合金母材を用いた Nb_3Sn 極細多芯線材の J_c -B 特性を示す。なお、図中にそれぞれの試料における熱処理温度を表している。10Zn、5.0In 及び 2.0In 試料等の三元系合金母材を用いた Nb_3Sn 線材の J_c -B 特性は 16Sn 試料と比較して低下する傾向にあった。これは、通常のプロンズ法線材 (16Sn 試料) と比較して、三元系合金母材の初期 Sn 組成が小さいことに起因していると考えられる。一般的に、 Nb_3Sn 線材の J_c 特性は Nb_3Sn 相の生成反応に寄与する初期 Sn 組成に依存するとされている。つまり、マトリックス中の初期 Sn 量が J_c 特性における重要なパラメータとなっている。本研究での三元系合金の初期 Sn 組成は通常

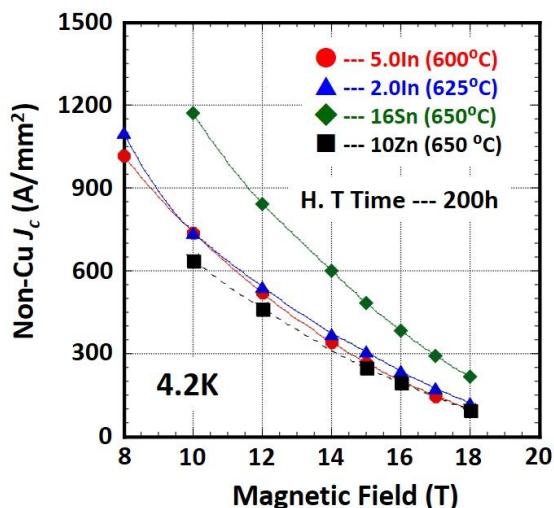


Fig.3 200 時間熱処理された三元系合金母材を用いた Nb_3Sn 極細多芯線材の J_c -B 特性

使用される Cu-16wt%Sn 合金よりも小さくなっており、低い Nb₃Sn 相の体積分率が J_c 特性の低下の主要因と考えられる。この要因を裏付けるように、生成した Nb₃Sn 相の断面積だけで算出した J_c 特性 (Nb₃Sn layer J_c) は、いずれの試料においてほぼ同じであった。三元系ブロンズ合金中の添加元素効果についても検討した。初期 Sn 組成が同じである 10Zn 試料と 5.0In 試料を比較すると、5.0In 試料の J_c-B 特性の方が高い結果となった。また、5.0In 試料の最適熱処理温度が 10Zn 試料よりも著しく低くなり、600 であった。これらのことから、三元系ブロンズ合金中の In 元素は、Zn 元素よりも Nb₃Sn 相の生成を促進させる効果があり、低温熱処理に起因した Nb₃Sn 結晶粒の微細化によって J_c-B 特性が改善したと考えられる。

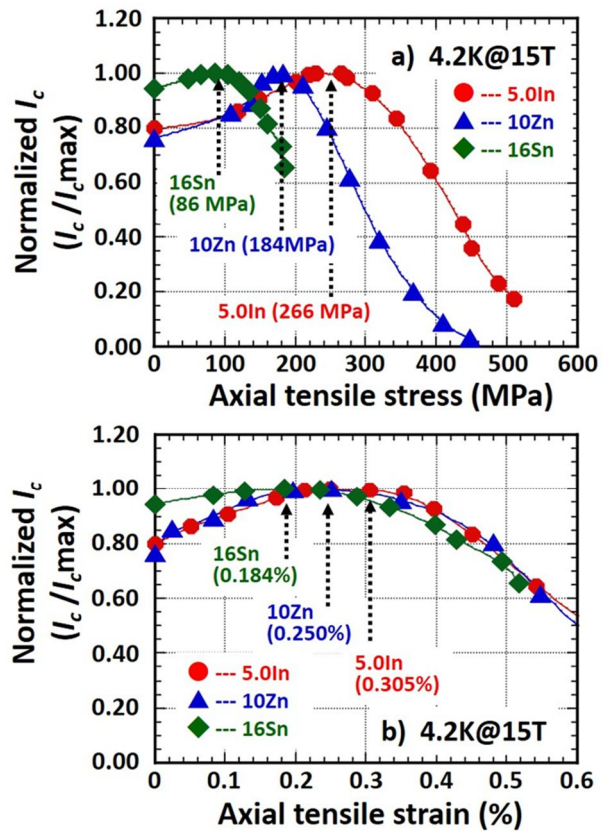


Fig.4 軸方向引張変形下の 5.0In、10Zn、16Sn 試料における正規化された I_c ($I_c / I_{c,max}$) 特性の引張応力及び引張歪み量依存性 (a)応力、(b)歪み)

【三元系合金を母材とした Nb₃Sn 線材の I_c 特性における一軸引張歪み及び応力依存性】

5.0In、10Zn 及び 16Sn 線材試料における一軸引張変形に伴う規格化臨界電流特性の変化について検討した。本研究での引張変形下における最大の I_c 特性を $I_{c,max}$ とし、そして各々の引張変形下での I_c 特性を $I_{c,max}$ で規格化することで、引張変形における臨界電流特性変化が明らかになると考えた。Fig.4 に各種線材における一軸引張変形に伴う規格化臨界電流特性の変化割合を示す。Fig.4 (a)は規格化 I_c 特性と引張応力の関係を、そして(b)は規格化 I_c 特性と引張歪み量の関係をそれぞれ示す。16Sn 試料の場合、引張変形に伴って I_c 特性が改善する傾向が見られた。これはこれまでの報告と同様であり、内部ひずみ(圧縮ひずみ)が引張変形に伴って緩和されたためと考えられる。80 MPa あたりの引張応力で最大の I_c 特性を示し、その後応力の増加に伴って単調に減少した。一方、10Zn 及び 5.0In 試料の場合、16Sn 試料と同様に、引張変形に伴って I_c 特性が改善する傾向が見られた。これも 16Sn 試料と同様に、内部ひずみが緩和されたためと考えられる。また、 $I_{c,max}$ が得られる引張応力は、5.0In 試料では 266 MPa、10Zn 試料では 184 MPa となった。これにより、三元系合金を母材とすることで、機械特性が改善することが示唆され、特に Cu-Sn-In 合金にて、通常のプロズ法と比較して 3 倍以上の許容応力を示した。

一方、三元系合金を母材として用いた試料における最大の I_c 特性が得られる引張歪み量についても、Fig.4 (a)に示した応力との関係と同様で、通常のプロズ法線材の 0.18%と比較しても高歪み側に大きくなり、5.0In 試料では 0.305%、10Zn 試料では 0.250%となった。以上の結果から、三元系合金を母材として用いることで、プロズ法線材における機械特性の改善が可能であることが明らかになった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 12件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 1件）

| | |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名 Y. Hishinuma, H. Oguro, H. Taniguchi and A. Kikuchi | 4. 巻 28 |
| 2. 論文標題 Changes of Superconducting Properties due to the Unidirectional Tensile Deformation on Bronze processed Nb3Sn Multifilamentary Wires using various Cu-Sn-Zn Ternary Alloy Matrices | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 IEEE Transaction on Applied superconductivity | 6. 最初と最後の頁 6000704 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2018.2794528 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|---|---------------------|
| 1. 著者名 Y. Hishinuma, H. Oguro, H. Taniguchi, S. Awaji and A. Kikuchi | 4. 巻 502 |
| 2. 論文標題 Superconductivity under uniaxial tensile strain on internal reinforced Nb3Sn multifilamentary wire using Cu-Sn-Zn ternary alloy matrix | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. | 6. 最初と最後の頁 12715 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1757-899X/502/1/012175 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|---------------------|
| 1. 著者名 Y. Hishinuma, T. Taniguchi and A. Kikuchi | 4. 巻 145 |
| 2. 論文標題 Development of bronze processed Nb3Sn wires using various Cu-Sn-In ternary alloy matrices | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Fusion Engineering and Design | 6. 最初と最後の頁 94-99 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.fusengdes.2019.01.092 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|----------------------|
| 1. 著者名 Y. Hishinuma, T. Taniguchi and A. Kikuchi | 4. 巻 148 |
| 2. 論文標題 Development of the internal matrix reinforcement bronze processed Nb3Sn multicore wires using Cu-Sn-In ternary alloy matrix for fusion magnet application | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Fusion Engineering and Design | 6. 最初と最後の頁 111269 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.fusengdes.2019.111269 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|---|---------------------|
| 1. 著者名 李 昇原、川向 大地、菱沼 良光、土屋 大樹、西村 克彦、會田 哲夫、菊池 章弘、S. Mikmekova、谷口 博康、松田 健二 | 4. 巻 58 |
| 2. 論文標題 Cu基三元系合金を用いて作製した超伝導Nb3Sn線材のミクロ組織に対するTi添加の影響 | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 「銅及び銅合金」日本銅会誌 | 6. 最初と最後の頁 77-81 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

| | |
|--|---------------------|
| 1. 著者名 A. Nishimura, T. Nakamoto, M. Yoshida, M. Iio, M. Yamazaki, T. Toyama, Y. Hishinuma, H. Oguro and S. Awaji | 4. 巻 32 |
| 2. 論文標題 Effect of neutron irradiation on Nb3Sn wire | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Superconductor Science and technology | 6. 最初と最後の頁 24004 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6668/aaf903 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|---------------------|
| 1. 著者名 Y. Hishinuma, T. Taniguchi and A. Kikuchi | 4. 巻 145 |
| 2. 論文標題 Development of bronze processed Nb3Sn wires using various Cu-Sn-In ternary alloy matrices | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Fusion Engineering and Design | 6. 最初と最後の頁 94-99 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.fusengdes.2019.01.092 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|----------------------|
| 1. 著者名 Y. Hishinuma, T. Taniguchi and A. Kikuchi | 4. 巻 148 |
| 2. 論文標題 Development of the internal matrix reinforcement bronze processed Nb3Sn multicore wires using Cu-Sn-In ternary alloy matrix for fusion magnet application | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Fusion Engineering and Design | 6. 最初と最後の頁 111269 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.fusengdes.2019.111269 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名 Y. Hishinuma, H. Oguro, H. Taniguchi and A. Kikuchi | 4. 巻 28 |
| 2. 論文標題 Changes of Superconducting Properties due to the Unidirectional Tensile Deformation on Bronze-processed Nb3Sn Multifilamentary Wires using various Cu-Sn-Zn Ternary Alloy Matrices | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 IEEE Transaction on Applied superconductivity | 6. 最初と最後の頁 6000704 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2018.2794528 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|---|---------------------|
| 1. 著者名 Y. Hishinuma, H. Oguro, H. Taniguchi, S. Awaji and A. Kikuchi | 4. 巻 502 |
| 2. 論文標題 Superconductivity under uniaxial tensile strain on internal reinforced Nb3Sn multifilamentary wire using Cu-Sn-Zn ternary alloy matrix | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. | 6. 最初と最後の頁 12175 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1757-899X/502/1/012175 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|---|---------------------|
| 1. 著者名 菱沼良光、小黒英俊、谷口博康、菊池章弘 | 4. 巻 24 |
| 2. 論文標題 Development of the bronze processed Nb3Sn multifilamentary wires using Cu-Sn-Zn ternary alloy matrix | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 Fusion Engineering and Design | 6. 最初と最後の頁 90-93 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2017.04.035 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名 菱沼良光、谷口 博康、菊池 章弘 | 4. 巻 80 |
| 2. 論文標題 Cu-Sn-Zn固溶ブロンズ合金を用いたNb3Sn極細多芯線材 | 5. 発行年 2016年 |
| 3. 雑誌名 日本金属学会論文誌 | 6. 最初と最後の頁 473-479 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi.org/10.2320/jinstmet.JC201607 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である) | 国際共著 - |

[学会発表] 計29件(うち招待講演 0件/うち国際学会 15件)

| |
|--|
| 1. 発表者名 菱沼 良光、谷口 博康、菊池 章弘 |
| 2. 発表標題 Cu-Sn-In三元系ブロンズを用いたNb ₃ Sn多芯線材の超伝導特性 |
| 3. 学会等名 第96回春季低温工学・超電導学会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 菱沼 良光、小黒 英俊、嶋田 雄介、淡路 智、谷口 博康、菊池 章弘 |
| 2. 発表標題 固溶強化機構による内部強化ブロンズ法Nb ₃ Sn線材の開発 |
| 3. 学会等名 第12回核融合エネルギー - 連合講演会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Y. Hishinuma, H. Oguro, H. Taniguchi, S. Awaji and A. Kikuchi |
| 2. 発表標題 Superconductivity under uniaxial tensile strain on the internal reinforced Nb ₃ Sn multifilamentary wire using Cu-Sn-Zn ternary alloy matrix |
| 3. 学会等名 ICEC-ICMC 2018 (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Y. Hishinuma, H. Oguro, H. Taniguchi, and A. Kikuchi |
| 2. 発表標題 Development of the bronze processed Nb ₃ Sn wires using various Cu-Sn-In ternary alloy matrices |
| 3. 学会等名 30th Symposium on Fusion Technology (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Y. Hishinuma, H. Taniguchi and A. Kikuchi |
| 2. 発表標題 Superconducting properties of the bronze processed Nb3Sn multifilamentary wires using various Cu-Sn-In ternary alloy matrices |
| 3. 学会等名 Applied Superconductivity Conference 2018 (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 菱沼 良光、谷口 博康、菊池 章弘 |
| 2. 発表標題 Cu-Sn-In三元系合金母材を用いたNb3Sn極細多芯線材における超伝導特性と微細組織 |
| 3. 学会等名 第98回春季低温工学・超電導学会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Y. Hishinuma, H. Taniguchi and A. Kikuchi |
| 2. 発表標題 Development of the matrix reinforced Nb3Sn wires using Cu-Sn-In alloy matrices |
| 3. 学会等名 14th European Conference on Applied Superconductivity 2019 (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 菱沼 良光、谷口 博康、菊池 章弘 |
| 2. 発表標題 Cu-Sn-In三元系合金母材を用いた内部補強Nb3Sn極細多芯線材の開発 |
| 3. 学会等名 2019年日本金属学会秋期大会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Y. Hishinuma, H. Oguro, H. Taniguchi, S. Awaji and A. Kikuchi |
| 2. 発表標題 Mechanical strength evaluation of the internal matrix reinforced Nb3Sn multifilamentary wire using Cu-Sn-In ternary alloy matrix |
| 3. 学会等名 26th International Conference on Magnet technology 2019 (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Y. Hishinuma, H. Taniguchi, T. Mizuta, Y. Mizuta and A. Kikuchi |
| 2. 発表標題 Investigation of the Cu based binary alloys and the internal matrix reinforcement bronze processed Nb3Sn wires |
| 3. 学会等名 10th ACASC / 2nd Asian-ICMC / CSSJ Joint Conference (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 菱沼 良光、小黒 英俊、谷口 博康、淡路 智、菊池 章弘 |
| 2. 発表標題 三元系ブロンズ合金を用いた内部補強Nb3Sn線材の臨界電流特性における圧縮応力依存性 |
| 3. 学会等名 2020年日本金属学会春期大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 菱沼 良光、谷口 博康、菊池 章弘 |
| 2. 発表標題 Cu-Sn-In三元系合金母材を用いたNb3Sn極細多芯線材における超伝導特性と微細組織 |
| 3. 学会等名 第98回春季低温工学・超電導学会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Y. Hishinuma, H. Taniguchi and A. Kikuchi |
| 2. 発表標題 Development of the matrix reinforced Nb ₃ Sn wires using Cu-Sn-In alloy matrices |
| 3. 学会等名 14th European Conference on Applied Superconductivity 2019 (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 菱沼 良光、谷口 博康、菊池 章弘 |
| 2. 発表標題 Cu-Sn-In三元系合金母材を用いた内部補強Nb ₃ Sn極細多芯線材の開発 |
| 3. 学会等名 2019年度日本金属学会秋期大会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Y. Hishinuma, H. Oguro, H. Taniguchi, S. Awaji and A. Kikuchi |
| 2. 発表標題 Mechanical strength evaluation of the internal matrix reinforced Nb ₃ Sn multifilamentary wire using Cu-Sn-In ternary alloy matrix |
| 3. 学会等名 26th International Conference on Magnet technology 2019 (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Y. Hishinuma, H. Taniguchi, T. Mizuta, Y. Mizuta and A. Kikuchi |
| 2. 発表標題 Investigation of the Cu based binary alloys and the internal matrix reinforcement bronze processed Nb ₃ Sn wires |
| 3. 学会等名 10th ACASC / 2nd Asian-ICMC / CSSJ Joint Conference (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 菱沼 良光、 谷口 博康、 菊池 章弘 |
| 2. 発表標題 Cu-Sn-In三元系ブロンズを用いたNb3Sn多芯線材の超伝導特性 |
| 3. 学会等名 第96回春季低温工学・超電導学会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 菱沼 良光、小黒 英俊、嶋田 雄介、淡路 智、谷口 博康、菊池 章弘 |
| 2. 発表標題 固溶強化機構による内部強化ブロンズ法Nb3Sn線材の開発 |
| 3. 学会等名 第12回核融合エネルギー - 連合講演会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Y. Hishinuma, H. Oguro, H. Taniguchi, S. Awaji and A. Kikuchi |
| 2. 発表標題 Superconductivity under uniaxial tensile strain on the internal reinforced Nb3Sn multifilamentary wire using Cu-Sn-Zn ternary alloy matrix |
| 3. 学会等名 ICEC-ICMC 2018 (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Y. Hishinuma, H. Oguro, H. Taniguchi, and A. Kikuchi |
| 2. 発表標題 Development of the bronze processed Nb3Sn wires using various Cu-Sn-In ternary alloy matrices |
| 3. 学会等名 30th Symposium on Fusion Technology (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Y. Hishinuma, H. Taniguchi and A. Kikuchi |
| 2. 発表標題 Superconducting properties of the bronze processed Nb ₃ Sn multifilamentary wires using various Cu-Sn-In ternary alloy matrices |
| 3. 学会等名 Applied Superconductivity Conference 2018 (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 菱沼良光、小黑英俊、谷口博康、菊池章弘 |
| 2. 発表標題 Changes of superconducting properties due to the unidirectional tensile deformation on bronze-processed Nb ₃ Sn multifilamentary wires using various Cu-Sn-Zn ternary alloy matrices |
| 3. 学会等名 25th International Conference on Magnet Technology (国際学会) |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 菱沼良光、谷口博康、菊池章弘 |
| 2. 発表標題 Microstructure and superconducting properties of bronze-processed Nb ₃ Sn layer using Cu-Sn-In ternary matrix |
| 3. 学会等名 13th European Conference on Applied Superconductivity (国際学会) |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 菱沼良光、小黑英俊、谷口博康、菊池章弘 |
| 2. 発表標題 Cu-Sn-Zn三元系ブロンズを用いたNb ₃ Sn線材の超伝導特性における一方向引張ひずみ効果 |
| 3. 学会等名 2017年度春季(94回)低温工学・超電導学会 |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 菱沼良光、谷口博康、菊池章弘 |
| 2. 発表標題 Cu-Sn-In三元系合金母材を用いたNb3Sn超伝導線材の組織と超伝導特性 |
| 3. 学会等名 日本金属学会2017年度秋期(161回)講演大会 |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 菱沼良光、谷口博康、菊池章弘 |
| 2. 発表標題 ブロンズ法Nb3Sn線材の高強度化に向けた三元系ブロンズ母材へのIn添加 |
| 3. 学会等名 2017年度秋季(95回)低温工学・超電導学会 |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 菱沼 良光、谷口 博康、菊池 章弘 |
| 2. 発表標題 Nb3Sn超伝導線材の高強度化に関する研究 - ブロンズマトリックスのZn固溶強化の可能性 - |
| 3. 学会等名 2015年度春季低温工学・超電導学会 |
| 4. 発表年 2016年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 菱沼 良光、小黒英俊、谷口 博康、菊池 章弘 |
| 2. 発表標題 内部マトリックス強化による高強度 Nb3Sn 線材の開発 |
| 3. 学会等名 第11回 核融合エネルギー連合講演会 |
| 4. 発表年 2016年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Y. Hishinuma, H. Oguro, H. Taniguchi and A. Kikuchi |
| 2. 発表標題 Development of the bronze processed Nb3Sn multifilamentary wires using Cu-Sn-Zn ternary alloy matrix ” |
| 3. 学会等名 Symposium on Fusion Technology 2016 (国際学会) |
| 4. 発表年 2016年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|-------|--|---|----|
| 研究分担者 | 菊池 章弘 (KIKUCHI Akihiro) (50343877) | 国立研究開発法人物質・材料研究機構・機能性材料研究拠点・グループリーダー (82108) | |
| 研究分担者 | 小黒 英俊 (OGURO Hidetoshi) (90567471) | 東海大学・工学部・講師 (32644) | |
| 研究分担者 | 嶋田 雄介 (SHIMADA Yusuke) (20756572) | 東北大学・金属材料研究所・助教 (11301) | |
| 研究分担者 | 田中 照也 (TANAKA Teruya) (30353444) | 核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授 (63902) | |
| 研究分担者 | 田村 仁 (TAMURA Hitoshi) (20236756) | 核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授 (63902) | |