

平成 22 年 5 月 13 日現在

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2007～2009

課題番号：19360135

研究課題名（和文）

A15 型高磁場用超伝導材料の歪みによる反磁性および輸送電流特性劣化に関する研究

研究課題名（英文） Diamagnetic property and transport current degradation
of A15 superconductor by strain

研究代表者

西村 新 (NISHIMURA Arata)

核融合科学研究所・炉工学研究センター・教授

研究者番号：60156099

研究成果の概要（和文）：

代表的な A15 型高磁場用超伝導材料であるニオブ・スズ(Nb₃Sn)超伝導線の、歪み状態での臨界電流（超伝導状態を維持することができる輸送電流の最大値）劣化を調べるためにウォルターズスプリング型装置を設計・製作した。実用ニオブ・スズ超伝導線をハンダ付けした本装置を、18 テスラ超伝導マグネットに設置し、液体ヘリウム(温度 4.2 K=-269 °C)中で輸送電流特性、磁化特性を調べた。その結果、1.0%歪み印加により輸送電流特性の顕著な劣化が観測されたが、磁化には顕著な変化は観測されなかった。

研究成果の概要（英文）：

A Walters' spiral apparatus was developed. Using the apparatus, a degradation of critical current, which is the maximum transport current, can be investigated for Nb₃Sn superconductor as a typical A15 superconductor for a high magnetic field use. A practical Nb₃Sn superconductor was soldered onto the Walters' spiral and immersed in liquid helium in an 18-T superconducting magnet. The transport current and the magnetic properties were investigated at 4.2 K, 18 T. 1.0% strain application caused a remarkable degradation in transport current property. However, a clear change in magnetic property was not observed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	2,800,000	840,000	3,640,000
2008 年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2009 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	5,900,000	1,770,000	7,670,000

研究分野：核融合炉工学

科研費の分科・細目：核融合学

キーワード：高磁場、超伝導、A15、輸送電流、磁化

1. 研究開始当初の背景

医療用高磁場 MRI、核磁気共鳴分析器(NMR)、加速器、さらには核融合などでは、大型・強

磁場の超伝導マグネットの必要に迫られている。現在、高磁場超伝導マグネットの開発のために用いられている材料は、A15 型の結

晶構造をもつ金属間化合物 Nb_3Sn である。実際の研究、あるいは産業のトレンドを見たとき、研究は高温超伝導酸化物 (HTS) 材料に集中しているが、産業応用、特に日本における超伝導産業では、ほとんどが NbTi 線材を適用した比較的低磁場を利用した超伝導機器である。

現在までに A15 超伝導材料が普及していない理由の一つとして、高コストが上げられる。しかし、国際熱核融合炉 (ITER) 計画において今後 2 年間で約 500 トンの Nb_3Sn 線材が製造される予定であり、これはこれまでの世界全体の年間生産実績の約 20 倍を 2 年間で生産することに相当する。従って、ITER 計画は Nb_3Sn 線材のコスト低減を引き起こし、A15 材料の普及を促進して行くことが期待される。一方で、日本の A15 超伝導材料応用研究は、世界と比較して進展が遅い。欧米では NMR、次世代加速器、核融合関連機器の製造・開発を継続的に行っている。最近では、中国、韓国もそれに続こうとしている。現状、日本では製造メーカー 1 社だけが、主として国内向けに NMR を製造しているだけである。その生産量は、海外にくらべて数 10 分の 1、あるいはそれ以下である。さらに、高磁場 MRI の開発は皆無である。研究所レベルでは、ITER 用マグネットや超高磁場 NMR を開発・研究しているが、海外に大きく後れている。日本でも、第三元素添加された Nb_3Sn 、 Nb_3Al の材料研究が活発に行われているが、実際の応用に使える線材という意味では、欧米、韓国、中国が Sn の量を増やして効率的に Nb_3Sn を生成するプロセス (内部拡散法、チューブ法等) を採用しているのに対して、日本では Sn 量が制限される、言い換えれば臨界電流密度が前述の方法の半分以下に制限されるブロンズ法が主流である。このような状況にある日本では、 Nb_3Sn 等の A15 型超伝導材料の開発および応用研究にさらに一層注力しなければならない。応用研究において、A15 型超伝導材料を使いこなすことができれば、未来の高温超伝導大型・強磁場マグネット開発に適用可能な装置技術も獲得できる。

2. 研究の目的

A15 型超伝導材料応用における最大の問題は、機械的な歪みによる劣化である。機械的歪みによる劣化は 2 種類に分類される。一つは A15 型材料固有の結晶歪みによるもので、もう一つはフィラメントの機械的破断による永久損傷である。これまでの機械的歪みによる特性劣化の評価においては、実際に試料に超伝導電流を流す、通電法のみが採用されてきた。

臨界電流測定法としては、超伝導体の反磁性、すなわち遮閉電流から臨界電流を評価する磁化法と、輸送電流で評価する通電法の 2

種類がある。通電法では、連続した超伝導線の一部でも損傷したら臨界電流として見なされる。しかし、磁化法では、反磁性を示す超伝導物質の遮蔽電流を計測していることから、超伝導フィラメント破断は臨界電流の低下として観測されない。そこで本研究では、同一サンプルについて、機械的歪みをパラメータとして、通電法による臨界電流密度 (J_{c1}) と磁化法による臨界電流密度 (J_{c0}) の同時計測を行い、機械的歪みによる A15 型超伝導材料の特性劣化を詳細に調べることを試みた。信号変化は大変小さいことが予想されるため、実験方法そのものを詳細に検討した。

3. 研究の方法

A15 型超伝導線材の歪みによる特性劣化を評価する装置として、Walters' spring (ウォルターズ型コイルばね) 式機械的歪み印加装置を開発した。一般にこの装置を用いた研究では、輸送電流特性のみが評価されているが、本研究ではピックアップコイル法により磁化も同時に調べることにした。従って、一般的には 5 ターン程度であるウォルターズ型コイルばねのターン数を 15 ターンとし、ばねのピッチも 5mm と小さくした。このことにより、ピックアップコイル内に存在する超伝導体の体積を増やすことができ、計測感度の向上が期待できる。

ウォルターズ型コイルばねによる機械的歪み印加は、線材軸方向の歪みである。そこで、既に開発し、核融合科学研究所に既設の TRAPSE 装置を用いて、ケーブル導体に横圧縮荷重を印加し、それによる輸送電流劣化についても調べることにした。本装置において、素線ではなくケーブルを扱うのには次のような理由がある。ケーブルでは、傷みやすい超伝導素線を並列化することで大型導体を実現している。しかし、横圧縮荷重により、素線間のクロス・オーバー (交差) 箇所による局所的な曲げによる応力集中が発生し、顕著な劣化が発生することが定性的に分かってきている。そこで、本装置を用いて定量的な評価を試みるものである。

4. 研究成果

(1) ニオブ・スズ超伝導多重よりケーブルの横圧縮による輸送電流特性劣化

Nb_3Sn 超伝導多重撚りケーブルを横圧縮して、通電法による臨界電流特性劣化について評価した。30 MPa 程度の横方向圧縮応力を印加することで、臨界電流が 1/2 以下になることを示した (図 1)

しかし、本サンプルでは圧縮応力を印加できる長さが外径 50 mm、1 ターンと短いため、試料体積が小さく磁化測定法には適さない。 $NbTi$ 超伝導多重撚りケーブルを用いて 12 ターンサンプルを作製し、長尺サンプルに対し

て均等に横方向圧縮力を印加可能な機構を開発した。本装置により、約 1m のケーブルに対して均等に横方向圧縮応力を印加できた。実際に応力が印加されていることは、ロードセルの出力のみならず、素線間接触抵抗の変化としても確認された。

併せて、横方向圧縮による素線の変形挙動

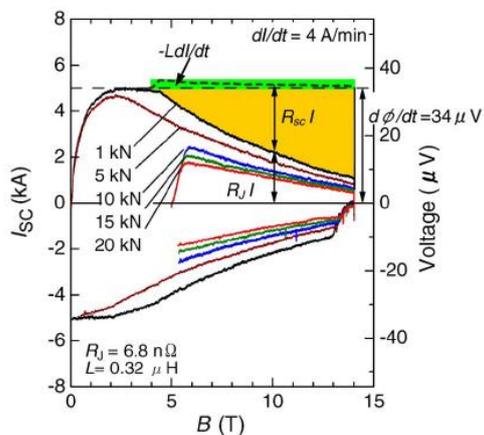


図 1: 横圧縮荷重を変化させたときの飽和誘導電流の印加磁界依存性。磁場の増加とともに臨界電流は減少する。また、負荷荷重の増加によっても臨界電流は減少する。

解析を ANSYS を用いて実施した。素線を超伝導領域および安定化銅領域に分割し、圧縮治具により横方向に圧縮する条件で計算した。ここで、素線および圧縮治具表面にはギャップ要素を適用し、非線形解析を行った。

(2) 実用ニオブ・スズ超伝導素線の引張り歪みによる輸送電流特性変化および磁化特性変化

代表的な A15 型超伝導線材である実用ニオブ・スズ超伝導線の歪みによる輸送電流特性変化および磁化特性変化を調べるために、ウォルターズ型コイルばねを設計、製作した。ばねの材料には時効処理して弾性域を拡張したベリリウム銅を用い、外径を 23 mm とした。この外形は使用する高磁場超伝導マグネットのボア径によって決定された。一般的なウォルターズ型コイルばねは 5 ターン程度で構成されるが、本研究ではピックアップコイル法による磁化測定も行うために、15 ターンとターン数を増加させた。

試料線材としては内部スズ法によるニオブ・スズ線材を用いることとした。未熟処理線材を熟処理用ポビンにウォルターズ型コイルばねの形状に合わせて 15 ターン巻き付け、650°C で 240 時間の超伝導生成熟処理を行った。熟処理後の線材をウォルターズ型コイルばねに取り付け、電極部のハンダ付け、歪ゲージ貼付け、電圧端子取り付けを行った。

このウォルターズ型コイルばねを装置に取り付けた。

磁化測定のためのピックアップコイルは 3600 ターン、キャンセルコイル 3000 ターンとして製作し、それぞれ試料部、試料部より 180 mm 離れた箇所に取り付けた。

印加歪みは歪みゲージによって調べることとした。ウォルターズ型コイルばねに取り付けたニオブ・スズ線材に歪みゲージを 3 箇所貼付けた。

実験は次の手順で行った。(1)ゼロ磁場で歪印加。(2)15T まで磁場を印加し、通電法による臨界電流 (I_c) 測定。(3)ゼロ磁場まで減磁。(4)0 T から 5 T まで励磁しその後 0 T に戻すサイクルで磁化を測定。この手順を、印加する機械的歪みを変化させて行った。

試料の長さは 108 cm としたが、長さ方向に渡って機械的歪みが均等に印加されていることが重要である。この点においては、図 2 に示すように 3 枚の歪みゲージの出力は 0.8% 印加歪みまでは非常に良い一致を示した。つまり、ウォルターズ型コイルばねを用いることで、1 m を超す長い試料に対して均等な引張り歪みを印加できることが示された。0.8% 印加歪み以上の歪み領域ではゲージ #3 が飽和しているが、これは、電極付近が局部的に劣化したためであり、磁化測定には全く影響の無い部分である。

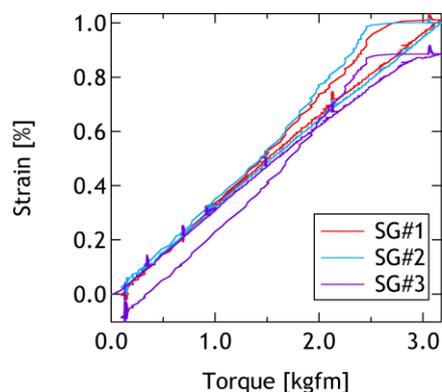


図 2: 印加トルクと 3 枚の歪みゲージ出力の関係。3 枚の歪みゲージ出力は 0.8% 歪み (2.7 kgfm トルク) までの範囲で非常に良く一致している。

通電法による I_c は印加歪みに対して単調減少し、1% 引張り歪印加時は当初 I_c の 12.6% まで劣化した。再びゼロ歪みに戻すと 73% まで回復したが、不可逆であった (図 3)。同図には n 値 (電流-電圧特性を両対数プロットしたときの傾き) の変化もプロットしているが、 n 値も不可逆な劣化を示している。従って、本試料にとって 1% 引張り歪が I_c 可逆限界を超えていることを意味し、超伝導フィラメントが破断していることが示唆される。

一方、ピックアップコイル法によって得られた磁化曲線を図4に示す。キャンセルコイルのターン数が少なかったためにバックグラウンドが重畳しているが、いずれの印加歪みでの磁化曲線のヒステリシスにも顕著な違いは見られない。傾きが異なるのはバックグラウンド分の変化である。

歪み印加により磁化のヒステリシスに顕著な変化が見られないということは、歪みを印加しても、結晶粒内の臨界電流には影響を与えないことを意味する。つまり、引張り歪みを印加することにより、フィラメントが破断し、通電電流が減少しても、結晶粒内の超伝導特性は不変であることが示された。

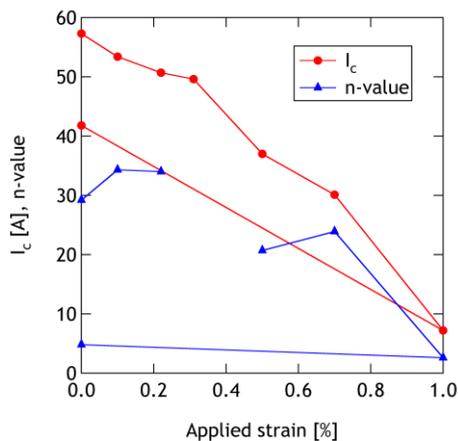


図3: 通電法による臨界電流(I_c)および n 値の変化。1.0%歪み印加により顕著な劣化を示し、歪み除荷後も回復していない。

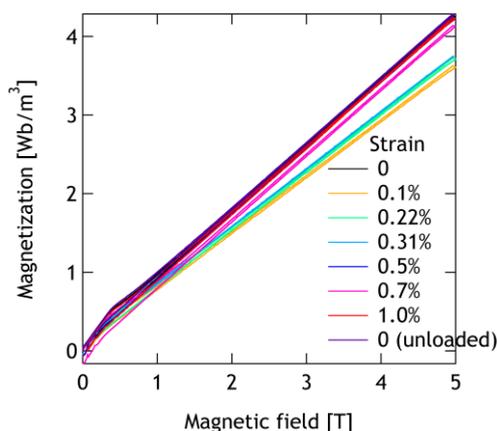


図4: 印加歪みを変化させたときの磁化曲線。大きく傾いているのはバックグラウンドの出力を十分にキャンセルできていないため。バックグラウンドの変化のために傾きが変化しているが、各磁化曲線のヒステリシスには顕著な変化は見られない。

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3件)

[1] G. Nishijima, H. Oguro, S. Awaji, H. Tsubouchi and K. Watanabe, Development of pre-bent high-strength Nb₃Sn cable with stainless-steel reinforcement strands, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 19 (2009) 1112. 査読有

[2] K. Seo, A. Nishimura and G. Nishijima, Evaluation of stability of NbTi multi-strand conductor by induced-current methods, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 18 (2008) 1118. 査読有

[3] K. Seo, A. Nishimura, Y. Hishinuma, K. Nakamura, T. Takao, G. Nishijima, K. Watanabe and K. Katagiri, Mitigation of critical current degradation in mechanically loaded Nb₃Sn superconducting multi-strand cable, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 18 (2008) 491. 査読有

[学会発表] (計6件)

[1] 西島 元, CuNb 補強 Nb₃Sn 超伝導線材における臨界電流の3次元歪効果, 第81回2009年度秋季低温工学・超伝導学会, 岡山大学, 2009年11月19日

[2] G. Nishijima, Effect of alumina dispersed copper composition for mechanical characteristic of Nb₃Sn wire, 21st International Conference on Magnet Technology (MT-21), Hefei, China. 2009年10月19日

[3] G. Nishijima, Three-dimensional strain effect of critical current for CuNb reinforced Nb₃Sn superconducting wire, 9th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS 09), Dresden, Germany. 2009年9月15日

[4] 西島 元, Nb₃Sn 線材の機械特性に与えるアルミナ分散銅複合の効果, 第80回2009年度春季低温工学・超伝導学会, 早稲田大学, 2009年5月14日

[5] G. Nishijima, Mechanical properties of Ta-filament-reinforced Nb₃Sn super-conducting wires, International Cryogenics Material Conference (ICMC), Seoul, Korea. 2008年7月24日

[6] K. Seo, A. Nishimura, Y. Hishinuma, K. Nakamura, T. Takao, G. Nishijima, K. Watanabe and K. Katagiri, Mitigation of

critical current degradation in mechanically loaded Nb₃Sn superconducting multi-strand cable, 20th International Conference on Magnet Technology (MT-20), Philadelphia, USA. 2007年8月27日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

2007年度

妹尾 和威 (SEO KAZUTAKA)

核融合科学研究所・炉工学研究センター・
助教

研究者番号：70370137

(妹尾 和威氏退職により代表者変更)

2008年度、2009年度

西村 新 (NISHIMURA ARATA)

核融合科学研究所・炉工学研究センター・
教授

研究者番号：60156099

(2) 研究分担者

菱沼 良光 (HISHINUMA YOSHIMITSU)

核融合科学研究所・炉工学研究センター・
助教

研究者番号：00322529

西島 元 (NISHIJIMA GEN)

東北大学・金属材料研究所・助教

研究者番号：30333884