

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 6 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560824

研究課題名（和文）中性子照射による超伝導特性変化の機構解明

研究課題名（英文）Study on change in superconducting properties by neutron irradiation

研究代表者

西村 新（NISHIMURA ARATA）

自然科学研究機構核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授

研究者番号：60156099

研究成果の概要（和文）：

ニオブ錫線材を対象として原子炉で中性子照射を行い、照射後、磁化特性を測定するとともに、磁場中での臨界温度を計測し、超伝導特性に及ぼす中性子照射の影響を検討した。その結果、0.1 MeV 以上のエネルギーを持つ中性子を 1 平方メートル当たり 10 の 22 乗個照射すると、臨界電流が増加し、同じく 10 の 24 乗個照射すると超伝導特性を示さなくなるとを明らかにした。中性子照射によって磁束のピン止め力が強化され、臨界電流が増加したと考えられる。

研究成果の概要（英文）：

Neutron irradiation tests on Nb<sub>3</sub>Sn strands were carried out in a fission reactor and the magnetization and the critical temperatures were measured to discuss the effect of irradiation on the superconductivity. When the irradiation of 10<sup>22</sup> n/m<sup>2</sup> (> 0.1 MeV) was done, the critical current increased. But the irradiation of 10<sup>24</sup> n/m<sup>2</sup> damaged the strand and it did not show the superconductivity. The irradiation would strengthen the pinning force resulting in increasing the critical current.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2012年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・核融合学

キーワード：中性子照射、超伝導、ニオブ錫線材、臨界温度、臨界磁場、臨界電流

## 1. 研究開始当初の背景

本研究申請時の研究の進展状況は以下のようなものであった。

加速器を周回する荷電粒子を絞るための 4 極マグネットでは、バッチを絞る際に多くの中性子や荷電粒子が発生し、そのために超伝導特性が劣化することが危惧されてきた。また、連続した D-T 反応を目標とした核融合反応では、反応によって生じた 14MeV の中

性は中性子遮蔽のブランケットなどを透過もしくは漏れいし、超伝導マグネットに到達する。このような中性子による超伝導マグネット材料の特性変化は超伝導磁石の運転上大変重要であり、幾つかの貴重な研究がなされてきている。これまでの研究を要約すると以下ようになる。

臨界電流  $I_c$  の増加は中性子照射によるはじき出し効果（Knock-on effect）で磁束のピ

ン止め点が増加もしくはピン止め力の増加によると考えられている。しかし、照射量が増えて格子間原子の増加、原子空孔の増加が進むと臨界電流は減少に転じ、照射しないものよりもさらに低下する。(T. Kuroda, et. al., J. of Atomic Energy Society Japan 37, (1995) pp.652-659)

臨界温度  $T_c$  は照射量の増加に対して明確な変化を示さないが、 $10^{22}$  n/m<sup>2</sup> 付近から低下し始める。これははじき出し効果によって本来 Nb が配列されるべき位置を Sn が占拠したり、Sn の位置に Nb が入ったりすることによって結晶としての規則性が乱れるためであるとされている。(A. R. Sweedler et. al., J. of Nuclear Materials 72 (1978) pp.50-69)

臨界磁場  $B_{c2}$  は照射によって増加すると考えられており、Kramer Plot での外挿により  $10^{22}$  n/m<sup>2</sup> 程度の照射によって 1T 程度増加するとされている。(S. Haindl et al., IEE Trans. on Applied Super., 15 (2005) pp.3414-3417)

図1から図3に研究代表者らによって本研究課題申請時までには得られていた研究成果を示す。

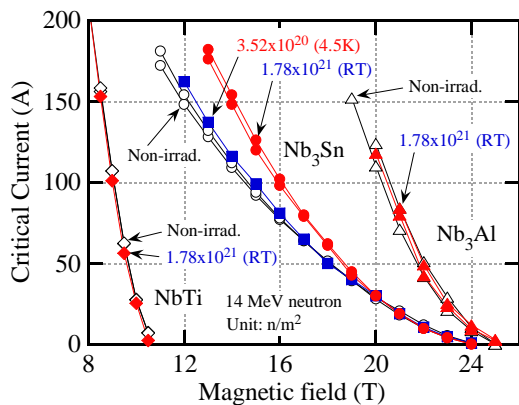


図1 中性子照射前後の臨界電流

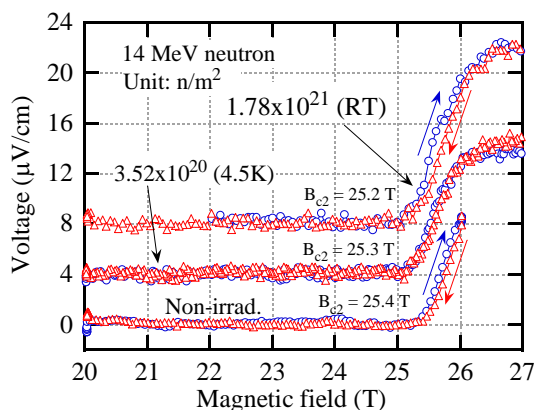


図2 中性子照射前後の臨界磁場

主たる研究対象は実用的な Nb<sub>3</sub>Sn 線材である。14MeV 中性子を  $1.78 \times 10^{21}$  n/m<sup>2</sup> まで

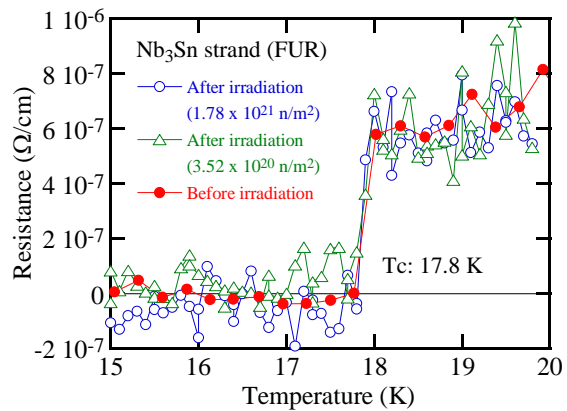


図3 中性子照射前後の臨界温度

照射し、 $I_c$ 、 $B_{c2}$ 、 $T_c$  を測定した。27 T までの領域でこのような結果を得たのは世界初である。

## 2. 研究の目的

これらの結果と考察から、図4のような超伝導臨界曲面を想定することができる。冶金的に決定される  $I_{mC} - B_{mC2} - T_{mC}$  曲面と、照射によって新たに形成される  $I_{irC} - B_{irC2} - T_{irC}$  曲面があり、この二つの臨界曲面の和が実験的に得られる特性であると考えられる。図1に示した磁場と臨界温度の関係は、図4では電流-磁場の面を見ていることになり、 $I_{mC} - B_{mC2}$  の関係に  $I_{irC} - B_{irC2}$  の関係が重畳し、約 20T 以下では  $I_{irC}$  が明確に形成され、約 20T 以上で  $I_{irC}$  が大変小さいことが予想される。即ち  $I_{irC}$  の磁場に対する変化は  $I_{mC}$  よりその絶対値が小さいものと考えられる。

このような推論に基づき、図4の超伝導臨界曲面を実験的に明らかにすれば、超伝導特性に及ぼす照射の全体像が明らかになり、その機構をより厳密に議論することが可能となる。

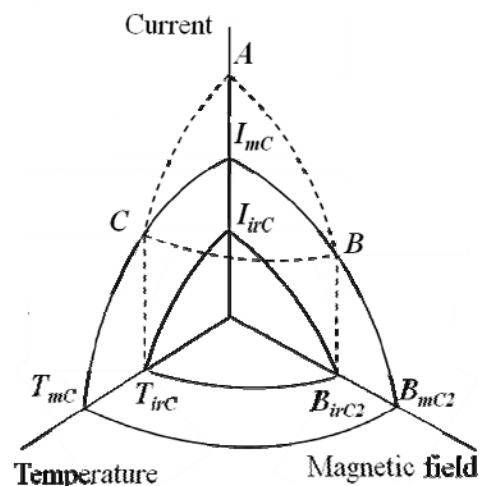


図4 電流、磁場、温度の超伝導曲面

本研究の目的は平成 22 年度から平成 24 年度までの期間において、実用線材である Nb<sub>3</sub>Sn 線材の図 4 の全体像を明らかにしようとするものである。

### 3. 研究の方法

本研究は中性子照射によって超伝導特性が変化する機構を明らかにする。そのために、所定の量の中性子を照射する必要がある。

基本的な照射試験の手順は以下のとおりである。

#### (1) 中性子照射する試料の準備。

中性子照射試料は Nb<sub>3</sub>Sn 線材である。未照射の試料と照射用試料を準備する。

(2) 日本原子力研究開発機構の実験用原子炉 (JRR-3)、ベルギー原子炉 (BR2) において、必要な照射量までの中性子照射を行う。照射温度は 100°C 以下とする。キャプセル内の温度計測のために温度指示材料を同封する。

(3) 照射後、残留放射能の減衰を待ち、臨界電流、臨界温度を計測する。また、照射試料の一部を用いて SQUID により磁化を測定する。これらの実験は東北大学 金属材料研究所 大洗センターの管理区域内で実施した。管理区域内には SQUID のほか、15.5T の超伝導マグネットおよび温度可変インサートが設置されており、15.5T までの磁場領域での臨界電流測定 (試料電流 500A まで) が可能である。

### 4. 研究成果

中性子照射後の Nb<sub>3</sub>Sn 線材の磁化特性を測定した結果を図 5 に示す。図には未照射材の結果、1.0x10<sup>21</sup> n/m<sup>2</sup> 照射した試料の結果、1.0x10<sup>22</sup> n/m<sup>2</sup> 照射した試料の結果、1.1x10<sup>24</sup> n/m<sup>2</sup> 照射した試料の結果を示す。中央部の結果は左軸に対応し、1.1x10<sup>24</sup> n/m<sup>2</sup> 照射した試料の結果を除く 3 セットの結果は右軸のように 5 倍に拡大して再度表示している。

1.0x10<sup>21</sup> n/m<sup>2</sup> の照射によって、磁化曲線の面積が大きくなっていることが分かる。面積の増加は 1.0x10<sup>22</sup> n/m<sup>2</sup> の照射でさらに大きく

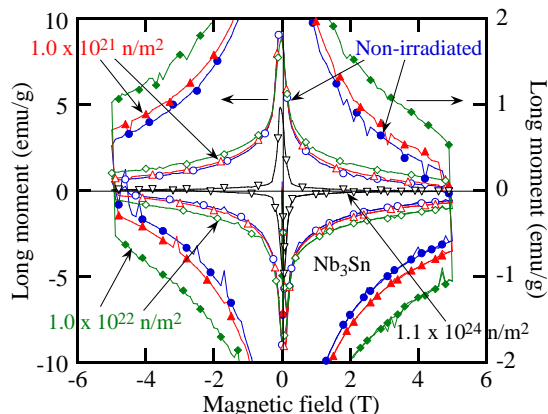


図 5 Nb<sub>3</sub>Sn 線材の中性子照射後の磁化特性

なる。超伝導フィラメント内の微小な渦電流によって磁化の度合いは変化するが、超伝導フィラメントの臨界電流が増加するとより大きな渦電流が流れ、磁化曲線の面積がより大きくなる。このことから 1.0x10<sup>21</sup> n/m<sup>2</sup> の照射によってすでに臨界電流が増加していることが分かる。1.0x10<sup>22</sup> n/m<sup>2</sup> の照射ではその増加がさらに顕著となるが、1.1x10<sup>24</sup> n/m<sup>2</sup> の照射では逆にほとんど超伝導を示さなくなっている。

この結果から、中性子照射によって臨界電流が一旦上昇し、過度の照射を受けると著しく低下することが分かる。

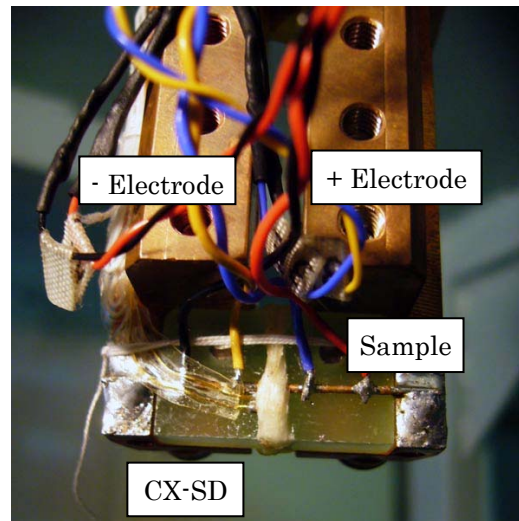


図 6 試料取付け状況。

Nb<sub>3</sub>Sn 線材試料の取り付け状況を図 6 に示す。試料は+一極に半田付けされ、抵抗値測定のため 4 本の電圧タップが取り付けられている。また、試料温度を計測するために CERNOX 温度センサーが試料に固定されている。試料温度を制御し、一定温度下で 100mA の電流を試料に流し、その抵抗値をナノボルト計で計測した。

計測結果を図 7 に示す。縦軸は磁場であり、横軸は試料温度である。図中の未照射の結果

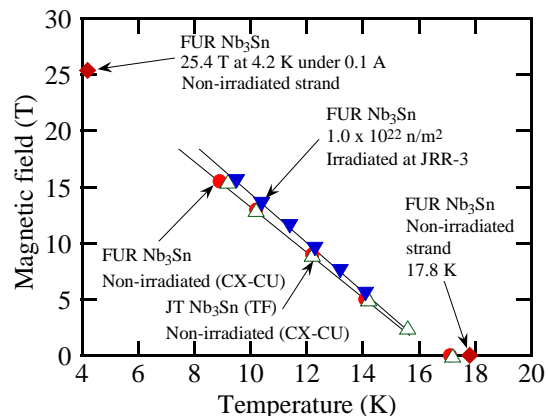


図 7 Nb<sub>3</sub>Sn 線材の温度と磁場の関係

は、FUR と JT との 2 種類の Nb<sub>3</sub>Sn 線材の結果を示しており、それらの結果はほぼ一致している。FUR Nb<sub>3</sub>Sn 線材を 1.0x10<sup>22</sup> n/m<sup>2</sup>まで照射した試料では、実験結果を結ぶ直線の傾きが大きくなっており、絶対値も大きくなっていく。

この結果は、図 4 の磁場 (B) - 温度 (T) 平面に対応しており、B<sub>mC2</sub> - T<sub>mC</sub> 曲面に B<sub>irC2</sub> - T<sub>irC</sub> 曲面を加えた形となっている。また、磁化特性の結果は、ある一定の磁場、温度での臨界電流が上昇することを示しており、このことは図 4 の I<sub>mC</sub> - B<sub>mC2</sub> 曲面に I<sub>irC</sub> - B<sub>irC2</sub> 曲面が加えられた形となっている。すなわち、適度な中性子照射を行うと、超伝導局面そのものが膨張する結果が得られることが分かる。

#### 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) A. Nishimura, T. Takeuchi, S. Nishijima, K. Ochiai, G. Nishijima, K. Watanabe, M. Narui, H. Kurishita, T. Shikama, "Study on neutron irradiation effect of superconductors and installation of 15.5 T magnet in hot laboratory at IMR in Tohoku University," Journal of Nuclear Materials, 査読有 Vol. 417 (2011) pp. 842-845.

2) A. Nishimura, T. Takeuchi, S. Nishijima, K. Ochiai, G. Nishijima, K. Watanabe, and T. Shikama, "14 MeV Neutron Irradiation Effect on Critical Current and Critical Magnetic Field of Nb<sub>3</sub>Sn and Nb<sub>3</sub>Al Wires," Advances in Cryogenic Engineering, 査読有 Vol. 56 (2010) pp. 255-262.

[学会発表] (計 7 件)

1) 西村 新、竹内 孝夫、西嶋 茂宏、西島 元、小黒俊英、渡辺 和雄、四竈 樹男、落合謙太郎、中性子照射による Nb<sub>3</sub>Sn、Nb<sub>3</sub>Al 素線の超伝導特性変化、低温工学・超伝導学会、2010 年 12 月 2 日、鹿児島。

2) 西村 新、竹内 孝夫、西島 元、渡辺 和雄、山崎 正徳、四竈 樹男、広瀬 量一、三木 孝史、超伝導材料の中性子照射効果ー 15.5T 超伝導マグネットシステムの管理区域への導入ー、2011 年 11 月 10 日、低温工学・超伝導学会、金沢。

3) A. Nishimura, T. Takeuchi, S. Nishijima, H. Oguro, K. Ochiai, K. Watanabe, T. Shikama, Fast Neutron Irradiation Effect on Superconducting Properties of Nb<sub>3</sub>Sn and Nb<sub>3</sub>Al Strands, International Cryogenic Material Conference, June 16, 2011.

Spokane, USA.

4) A. Nishimura, Neutron Irradiation Effects on Superconducting Magnet Materials for Fusion, 6th Korea-Japan-Berkeley Symposium, June 28, 2011. UC Berkeley, USA

5) A. Nishimura, T. Takeuchi, G. Nishijima, H. Oguro, K. Watanabe, K. Ochiai, T. Shikama, Effects of Fast Neutron Irradiation on Nb<sub>3</sub>Sn Strand, The 22nd Magnet Technology Conference, September 14, 2011. Marseille, France.

6) A. Nishimura, T. Takeuchi, G. Nishijima, S. Nishijima, Y. Izumi, M. Imaizumi, T. Hemmi, K. Ochiai, H. Oguro, K. Watanabe, T. Shikama, Recent Results of Neutron Irradiation Effects on Superconducting Magnet Materials in Japan, Asia Plasma and Fusion Association Conference, November 2, 2011. Guilin, China.

7) A. Nishimura, T. Takeuchi, Gen Nishijima, K. Ochiai, K. Watanabe, D. Li, T. Shikama, A new facility for investigation on neutron irradiation effect on superconducting properties of Nb<sub>3</sub>Sn strand for fusion magnet, The 27th Symposium on Fusion Technology, September 26, 2012. Liege, Belgium.

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

西村 新 (NISHIMURA ARATA)

自然科学研究機構核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授

研究者番号：60156099

(2) 研究分担者

なし