

# 超伝導線材の高磁場超伝導特性に及ぼす中性子照射効果

## Neutron irradiation effect on superconducting properties of superconducting wires at high magnetic fields

核融合研 西村 新, 菱沼 良光, 阪本 光孝  
東北大・金研 西島 元

A. Nishimura<sup>1</sup>, Y. Hishinuma<sup>1</sup>, M. Sakamoto<sup>1</sup> and G. Nishijima<sup>2</sup>

<sup>1</sup> National Institute for Fusion Science

<sup>2</sup> Institute for Materials Research, Tohoku University

### 1. はじめに

D-D 反応や D-T 反応を起こさせることを目的とした大型の核融合装置の設計、建設が進められている。JT-60SA では D-D 反応による 2.45MeV 中性子の発生が予定され、超伝導コイルへの中性子照射量を低減するため B を含有した有機樹脂の開発がなされている。ITER では D-T 反応が予定され、水冷却のブランケットならびにブランケットの背後にあるプラズマ真空容器内部の冷却水によって中性子遮蔽が行われる。しかし、加熱用のポートなどから中性子が漏出し、また、ブランケットをごくわずかの中性子が透過するため、超伝導マグネットはこれらの中性子で照射されることになる。

このような中性子環境下で使用される超伝導マグネットの照射による特性変化を把握し、その特性変化の機構を解明することを目的として、中性子照射した超伝導線材の高磁場中での超伝導特性評価を行ってきた。ここでは、これまでに得られた主要な結果を報告する。

### 2. 実験方法の概要

#### 2-1. 中性子照射

照射に供した超伝導線材は NbTi、Nb<sub>3</sub>Sn、Nb<sub>3</sub>Al、Bi2212 である。長さは約 40mm で、中性子照射前に超伝導特性を計測している。

中性子照射は日本原子力研究所核融合中性子工学中性子源(FNS)で行った。FNSでは三重水素に重水素を衝突させ、14MeVのエネルギーを持つ中性子を発生させている。14MeV以外のエネルギーを持つ中性子の発生はなく、また、γ線もない。照射中の試料温度は室温もしくは4.5Kである。もう一つの中性子照射場は日本原子力研究開発機構のJRR-3である。実験用原子炉であり、中性子とともにγ線を受ける。試料はキャプセル内にセットされ、照射中の温度は約100°Cである。

FNSで所定の中性子量を照射した後、しばらく残留放射能の減衰を待ち、<sup>60</sup>Coが下限数量(100kBq)以下であることを確認後、FNSから東北大学金属材料研究所アルファ放射体実験室に移送した。JRR-3で照射したものは<sup>182</sup>Taが大量に生成され、現在この核種の登録手続きを行っていただいているところである。平成22年度には、所定の手続きが終了し、FNSで照射したものと同様、アルファ放射体に移送されるものと思われる。

アルファ放射体実験室の放射線管理区域で試料を試料ホルダーに取り付け、28Tハイブリッドマグネットでの超伝導特性評価試験の準備を行った。

#### 2-2. 照射線材の超伝導特性評価

アルファ放射体実験室で試料取り付けを行ったホルダーを強磁場超伝導材料研究センターに運び、28Tハイブリッドマグネットを用いて、4端子法で臨界電流、臨界磁場の測定を行った。放射化した試料の溶損に備えて、専用のクライオスタットを用いるとともにヘリウム回収ラインには専用のフィルターを設置した。

臨界温度は、FNSに設置しているGM冷凍機を用いて測定した。試料温度を4.5から20Kまで徐々に変化させ、4端子法で電圧計測を行った。

### 3. 実験結果

#### 3-1. Nb<sub>3</sub>Sn 線材の臨界電流の変化

Nb<sub>3</sub>Sn 線材の臨界電流の磁場依存性を Fig. 1 に示す。同図には、NbTi 線材と Nb<sub>3</sub>Al 線材の結果も同時に示す。NbTi 線材や Nb<sub>3</sub>Al 線材では、 $1.78 \times 10^{21} \text{ n/m}^2$  までの 14 MeV 中性子照射では、実験を行った範囲での臨界電流の変化は認められなかった。Nb<sub>3</sub>Al 線材の場合には、さらに低磁場側で臨界電流が増加している可能性があり、試料通電用の電源容量を 200A から 500A に変更することを計画している。

Nb<sub>3</sub>Sn 線材では、照射量の増加とともに明らかに臨界電流が増加した。特に低磁場側での増加が明確で、高磁場側では、ある磁場以上では臨界電流の増加が認められない。(未照射線材の臨界電流値と同じ臨界電流を示す。)未照射線材の臨界電流から増加し始める時の磁場を Border point と呼ぶとすれば、それぞれの照射量での Border point は、 $3.52 \times 10^{20} \text{ n/m}^2$  で約 17 T、 $1.78 \times 10^{21} \text{ n/m}^2$  で約 20 T、 $3.10 \times 10^{21} \text{ n/m}^2$  で約 22 T、 $1.78 \times 10^{21} \text{ n/m}^2$  で約 24 T である。

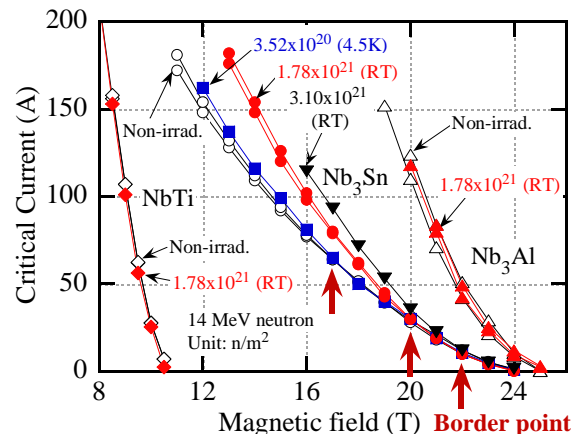


Fig. 1 Change in critical current of Nb<sub>3</sub>Sn wire by 14 MeV neutron irradiation.

$\times 10^{21} \text{ n/m}^2$ で約 20 T、 $3.10 \times 10^{21} \text{ n/m}^2$ で約 22 Tとなる。照射量が増えるにつれ低磁場側での臨界電流は増加するが、臨界電流が増加する Border point の磁場も増加する。このことは、中性子照射によって臨界電流-磁場曲線全体が変化するのではなく、低磁場側から順次臨界電流が増加して行くことを示している。言い換えると、ピン止め力の弱いピンが中性子照射によって導入された原子空孔や格子間原子などの照射欠陥によって次第に強化されて行っていることを示している。高い磁場の領域では、照射損傷によるピン止め力の強化が十分ではないため、臨界電流の増加に至っていないように思われる。

### 3-2. Nb<sub>3</sub>Sn 線材の臨界磁場の変化

Nb<sub>3</sub>Sn 線材の臨界磁場を測定した結果を Fig. 2 に示す。100 mA の一定の試料電流を流した状態で、外部磁場を 3.2 T/min で低磁場側から高磁場側へ、またその逆に高磁場側から低磁場側に変化させ、その間の試料電圧を示している。3 つのデータは縦軸方向にそれぞれ  $4 \mu\text{V/cm}$  ずつシフトさせ、重なりを防いでいる。

電圧が線形に増加すると仮定し、電圧が出始める時の磁場を臨界磁場とすると、未照射線材で 25.4 T、 $3.52 \times 10^{20} \text{ n/m}^2$  で 25.3 T、 $1.78 \times 10^{21} \text{ n/m}^2$  の照射後で 25.2 T であり、 $1.78 \times 10^{21} \text{ n/m}^2$  といった照射量では、照射による臨界磁場の変化は認められない。臨界磁場 ( $B_{c2}$ ) は、次式のように上部棚抵抗率 ( $\rho_n$ )、電子比熱係数 ( $\gamma$ ) と臨界温度 ( $T_c$ ) の積に比例する。

$$B_{c2} \propto \rho_n \gamma T_c$$

供試した試料は直径 0.7 mm の Nb<sub>3</sub>Sn の実用線材であり、全断面に占める Cu の面積比率は 20.5% である。Cu は中性子照射によりその抵抗値が増加する。従って、Fig. 2 中の上部棚抵抗率は  $1.78 \times 10^{21} \text{ n/m}^2$  の照射によって明らかに増加しているが、この増加が Nb<sub>3</sub>Sn の抵抗率の増加によるものとは断定できない。電子比熱係数は中性子照射によってほとんど変化しないものと考えられ、 $T_c$  は後述するように大きな変化はみられていない。厳密な議論をするためには、Nb<sub>3</sub>Sn 単体の試料によって照射による上部棚抵抗率の変化を実験的に求め、そ

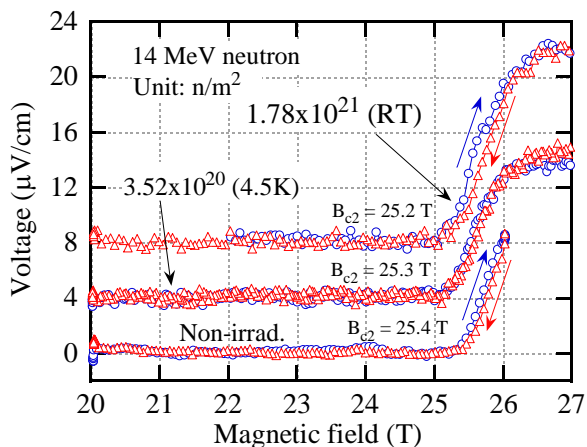


Fig. 2 Change in voltage against magnetic field of Nb<sub>3</sub>Sn wire under dB/dt of 3.2 T/min and current of 100 mA.

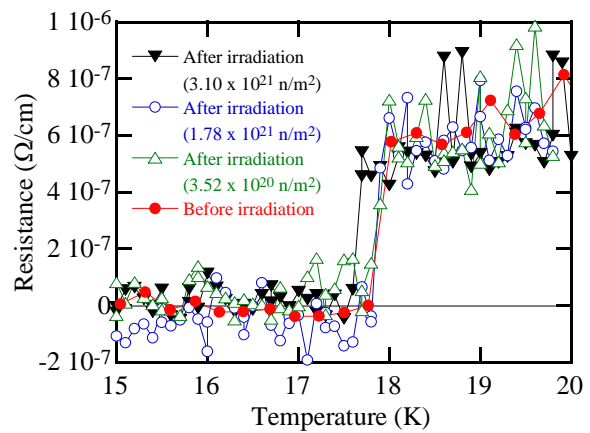


Fig. 3 Change in resistance of Nb<sub>3</sub>Sn wire against temperature before and after neutron irradiation.

れに基づいて議論する必要がある。

### 3-3. Nb<sub>3</sub>Sn 線材の臨界温度の変化

Nb<sub>3</sub>Sn 線材の臨界温度の測定結果を Fig. 3 に示す。14 MeV 中性子を所定量照射した後、試料を GM 冷凍機の第二ステージに取り付け、ステージ温度を 0.1 K/min で 4.5 K から 20 K まで昇温し、その時の試料抵抗を 4 端子法で測定した結果である。 $1.78 \times 10^{21} \text{ n/m}^2$  の照射量では臨界温度は 17.8 K で変化しなかったが、 $3.10 \times 10^{21} \text{ n/m}^2$  の照射量で臨界温度は 17.6 K となり、0.2 K 低下した。0.1 K は誤差の範囲と考えられるが、0.2 K の変化は有意な変化である。臨界温度は Nb<sub>3</sub>Sn 結晶を構成する原子の長範囲規則性 (Long range ordering) と強く関係しており、臨界温度が低下し始めたことは、高エネルギー中性子による弾き出しによって原子配列の規則性が乱れ始めていることを示している。

## 4. まとめ

これまでで得られている結果から、14 MeV 中性子照射による超伝導特性の変化は以下のような機構によって生じているのではないかと推察される。

中性子照射によって結晶を構成する原子が弾き出されその原子は格子間原子となる。弾き出された後には原子空孔が残り、これら格子間原子と原子空孔はピン止め点のようなポテンシャルの異なる場所に集まる傾向がある。そのような場所には量子化された磁束がピン止めされており、そのピン止め力は格子間原子や原子空孔が集合してくるにより強化される。そのために低磁場側での臨界電流は増加する。一方高磁場側では、その程度の照射欠陥の集合ではピン止め力の強化に至らず、臨界電流の増加は生じない。照射量が増え、照射欠陥の密度が上がると高磁場側でもピン止め力が強化され、臨界電流が増加する。照射量が増加し、臨界磁場に到達するようになると、臨界磁場においても臨界電流が増加し、臨界磁場が増加すると思われる。

このような臨界電流の増加過程において、すでに結晶の規則性は乱れ始めており、臨界温度の若干の低下が生じる。臨界電流の増加は続くものの臨界温度の低下はさらに大きくなるものと予想される。

今後も検討を継続する予定である。