

超伝導線材の臨界電流に及ぼす中性子照射効果

Neutron Irradiation Effect on Critical Current of Superconducting Wires

核融合科学研究所 西村 新, 妹尾 和威, 菱沼 良光
東北大・金研 西島 元, 渡辺 和雄
A. Nishimura¹, K. Seo¹, Y. Hishinuma¹, G. Nishijima², K. Watanabe²
¹ National Institute for Fusion Science
² Institute for Materials Research, Tohoku University

1. はじめに

核融合炉では、重水素と重水素の反応(D-D 反応)や重水素と三重水素の反応(D-T 反応)が生じ、高いエネルギーを持つ中性子が発生する。この中性子の運動エネルギーを、熱エネルギーを経由して電気エネルギーとして取り出すことが大きな開発目標である。

核融合炉にはこの高い運動エネルギーを持つ中性子を補足し、熱エネルギーに変換する役割を持つブランケットと呼ばれる機器が配置される。ブランケットは中性子遮蔽の役割、新たに三重水素を作り出す役割、中性子を増倍する役割などがある。しかし、高速中性子はブランケットで完全に切り切ることはできず、現在の設計例では 10^6 程度にまで低下させることができる。すなわち、プラズマ対向面側で 10^{28} n/m² 程度の中性子量がある時、超伝導マグネット側に 10^{22} n/m² 程度の中性子が透過(Penetration)して行くことになる。また、核融合炉にはプラズマを加熱するために必要な大きなポートが設けられる。このポートから、高い運動エネルギーを有する電氣的に中性な粒子が撃ち込まれる。D-T 反応などの核融合反応が持続している間、このポートから中性粒子は打ち込まれ続けており、核融合の結果生成される高速の中性子はこのポートから超伝導マグネットが設置されている空間に飛び出してくる。この現象を中性子漏洩(Streaming)と呼び、超伝導マグネットが被曝するもう一つの原因である。

中性子が原子核に当たるとそのエネルギーを原子核に与え、中性子は原子核に取り込まれる。すなわち放射性同位元素が形成される。放射性同位元素はその種類にもよるが、電磁波であるガンマ線を放出して安定元素に変化してゆく。超伝導マグネットの中性子被曝が続くと、このガンマ線の発生量が増え、マグネットの構成材料は中性子照射とガンマ線照射を同時に受けることになる。従って、核融合炉用マグネットの放射線照射効果は、中性子照射とガンマ線照射を考える必要があるが、本研究では、中性子照射の影響を主として明らかにしようとしている。

平成 20 年度では、中性子照射後の試料について、高磁場中での超伝導特性評価を行った。この実験は、本研究グループとして初めてのものであり、その結果の中には世界で初めて得られた研究成果が含まれている。すでに世界的に注目を集める研究成果となっている。本報告では、中性子照射研究と超伝導特性研究とを統合した研究体制の構築について触れ、Nb₃Sn、NbTi、Nb₃Al の各線材で得られた結果について紹介する。

2. 超伝導マグネット材料の中性子照射特性研究体制

平成 16 年度から、超伝導マグネット材料の中性子照射効果に関する研究を立ち上げ、日本原子力機構 核融合中性子工学中性子源(FNS)に極低温中性子照射ターゲット設備を導入した。FNS で得られる中性子は 14 MeV 単色の非常にきれいな中性子である。Flux がそれほど大きくないために長時間にわたる照射が必要であるが、室温空間の照射で 1.78×10^{21} n/m² までの照射を行ってきた。

この 14 MeV 中性子の照射試験を続けながら、強磁場超伝導材料研究センターのハイブリッドマグネットでの中性子照射した試料の超伝導特性評価試験の実施を希望してきた。いろいろな経緯を経て平成 20 年 1 月に東北大学の学内規則が定められ、28T ハイブリッドマグネットでの実験が可能となった。試験片の流れは以下のようになっている。

1. FNS で 14 MeV 中性子の照射試験を行い、照射試験後生成核種の同定と残留放射能測定を実施する。
2. 東北大学金属材料研究所アルファ放射体実験室に FNS から試料を払い出す。アルファ放射体実験室側は Co60 が 100 kBq 以下であれば受け入れることができる。この条件を満たすことを確認してから搬送する。
3. アルファ放射体実験室内で中性子照射した試料をハイブリッドマグネット用の試料ホルダーにセットする。この試料ホルダーは放射化した試料の専用ホルダーである。被曝を伴う作業であるので、放射線作業のルールに従って作業を実施する。
4. 28T ハイブリッドマグネットでの実験準備終了後、試料ホルダーをアルファ放射体実験室から強磁場センターに搬送し、予冷などの実験手順を経てハイブリッドマグネット内に設置する。そして、臨界電流測定、臨界磁場測定を実施する。
5. 必要な実験を終了した後、試料ホルダーをアルファ放射体実験室に戻し、試料を試料ホルダーから取り外す。試料の残留放射能を確認後、試料を FNS から搬送した容器に戻す。
6. FNS に向かって試料を払い出す。FNS では試料を受け入れ、適切な方法で保管する。

このように、核融合研究所、日本原子力機構 FNS、東北大学 金属材料研究所 アルファ放射体実験室、強磁場超伝導材料研究センターが協力して、超伝導線材の中性子照射効果に関する研究を遂行するための研究体制を構築してきた。今後もこの研究体制を維持し、発展させて行きたいと考えている。

3. 超伝導線材の中性子照射効果

古川電工から提供していただいた Nb₃Sn 線材および NbTi 線材、ならびに物質材料研究機構から提供していただいた Nb₃Al 線材を約 40mm 長さに切断し、適切な熱処理を施して中性子照射試験に供した。日本原子力研究開発機構の FNS の実験装置を図 1 に示す。Ti を内張りした回転ターゲットを製作し、その Ti に三重水素を吸収させている。その三重水素に重水素を 350 keV 程度に加速して衝突させ、D-T 反応を起こさせて 14 MeV の単色の中性子線を得ている。

クライオスタット内の GM 冷凍機の第 2 ステージは 4.5 K に保たれ、試料を 4.5 K に保持した状態で中性子を照射することができる。また、クライオスタット前面に図 2 に示すように試料を貼り付け、室温空間においても同時に照射試験を行った。D-T 反応は直径 6 mm 程度の領域で生じ、反応位置から遠ざかるほど neutron Flux は距離の二乗に反比例して小さくなる。

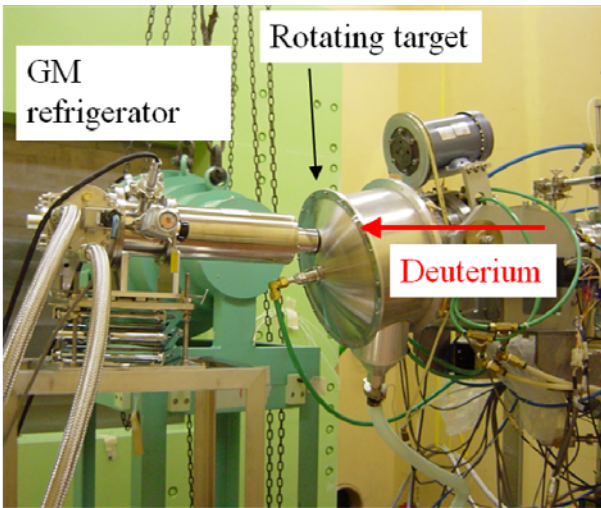


図 1 FNS に設置した極低温中性子照射ターゲット設備

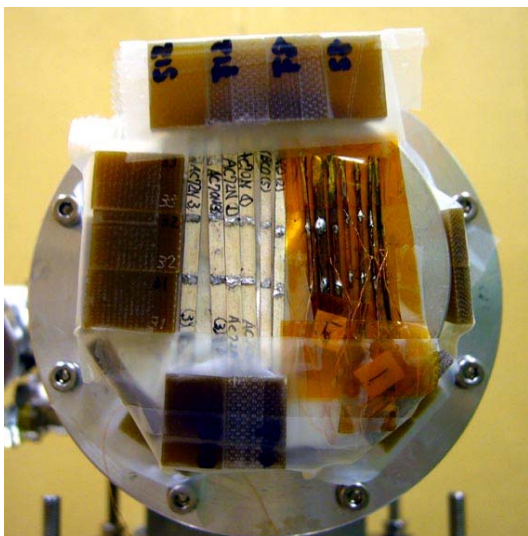


図 2 クライオスタット前面に取り付けられた室温照射試料。(照射試験後)

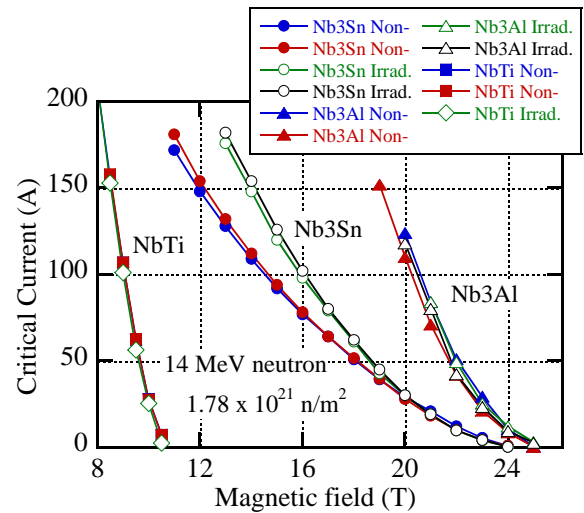


図 3 14 MeV 中性子の照射前後の臨界電流。(照射量: $1.78 \times 10^{21} \text{ n/m}^2$ 。試験温度: 4.2K)

平成 20 年度で超伝導特性を評価した試料は、図 2 の右側にカプトンテープで取り付けられている試料である。14 MeV 中性子の照射量は $1.78 \times 10^{21} \text{ n/m}^2$ である。

28T ハイブリッドマグネットで得られた臨界電流 (I_c) を図 3 に示す。試料通電用の電源が最大 200A であるため、いずれの試料においても 200A 以下の領域で実験を行っている。NbTi 線材では I_c の増加は認められておらず、臨界磁場 (B_{c2}) の変化も認められていない。Nb₃Sn 線材では明らかな I_c の増加が見られたが、磁場が大きくなるにつれて増加量は小さくなり、20T 以上ではほとんど増加が認められなくなった。 B_{c2} には有意な違いは認められず、照射効果は I_c に限定的に表れることが明らかになった。この B_{c2} が変化しないという現象は世界ではじめて確認された結果である。Nb₃Al は 6T で I_c が大きく増加したという報告があり、今回の結果は B_{c2} に近い磁場領域であるために顕著な増加がみられなかったものと考えられる。この Nb₃Al の B_{c2} 付近の結果も世界初の結果である。

4. まとめ

中性子照射後の放射化した超伝導線材の高磁場での超伝導特性を明らかにすることができた。照射効果の研究体制の構築を進め、体系的な研究を精力的に進める予定である。

謝辞

本研究は、核融合科学研究所共同研究の LHD 計画共同研究 (NIFS07KOBF014) の枠組みで行われてきている共同研究であり、東北大学 金属材料研究所 大洗センター、ならびに日本原子力研究所「核融合研究施設を利用する共同研究」の共同研究としても取り上げていただいている。また、核融合科学研究所の共同研究 (NIFS04KOBF008, NIFS06KOBF005, NIFS06UCFF013, NIFS08UCFF005, NIFS07KOBF014)、科学研究費補助金 (#16560725, #17656098, #1936035) の援助も得て実施された。