

Nb₃Sn 層形成を促進する Ti 添加場所に関する検討

Investigation on Ti-doped locations that promote Nb₃Sn layer formation

伴野信哉 (NIMS); 浅井航希 (上智大学, NIMS); 谷貝 剛 (上智大学)
BANNO Nobuya, (NIMS); ASAI Koki (Sophia Univ., NIMS); YAGAI Tsuyoshi (Sophia Univ.)

E-mail: banno.nobuya@nims.go.jp

1. はじめに

Ti は Nb₃Sn の高磁場特性を向上させる添加元素として広く知られている。内部スズ法 Nb₃Sn 線材では、Ti 添加場所として Sn 芯、Nb 芯、Cu マトリックスの3通りが考えられる[1]。前回、Sn 芯および Cu マトリックスへの Ti 添加を主に調査し、Cu に Ti を添加することで、Sn および Ti 拡散が促進することを報告した。Ti を Sn 芯に添加した場合に形成される Ti 化合物層の抑制が主要な要因と考えられる。今回、Nb 芯に Ti を添加する新しい方法を検討し、さらなる Nb₃Sn 生成促進を確かめた。Ti を Nb 側に添加することで、Ti 化合物の形成はほぼ抑制され、Nb₃Sn 層への Ti 拡散が進み、特に高磁場特性の大きな改善効果が見られた。

2. 断面設計コンセプト

微量 Ti を直接 Nb に固溶させず、Nb 芯の中心に Nb-47Ti 芯を配置し Ti の供給源とする。これによって流通する Nb と NbTi 合金を利用することができ、製造コストの増大を抑制できると考えられる。まず外径 15.5mm の Nb ロッド中心に Φ3.5mm の穴をあけ、外径 3.4mm の Nb-47Ti ロッドを挿入し、外径/内径=18/16mm の Cu 管を被せて冷間加工を施す。加工の際、適宜中間焼鈍を行って材料を軟化させる。NbTi 芯は Nb の中心に配置されているので、Nb がバリアの役目となって Cu/Ti の相互拡散が防がれている。この設計で Nb 芯におけるオーバールの Ti 組成は 1.76at%と見積られる。

上記複合材を冷間加工により 1 mm 高さの六角形状にしたのち、121 本束ね、15/12.4mm Cu パイプに挿入して高さ 0.8 mm の六角形状まで伸線し Nb モジュールとする。一方で、高さ 0.8 mm の Sn 単芯線 (13/10 mm Cu パイプ/9.5mm Sn ロッドを伸線) を準備する。その後、Nb モジュールを 12 本、Sn 単芯線を 7 本、Fig. 1 のような配置で組み込み、Nb バリア用パイプ (6.5/4.5 mm) と Cu パイプ (8/6.6 mm) に挿入して Φ0.6 まで伸線する。Nb バリア内の体積比は Cu:Nb:Sn=46:32:22 である。

作製した線材は 500°C-50 h+685°C-100 h (もしくは 200 h) の熱処理を施し Nb₃Sn 層を形成させた。試料の Nb₃Sn 層を観察するとともに臨界電流を測定した。本試料はバリア厚が大きいので、non-Cu J_c の代わりに、バリアの内側面積で J_c を割った Matrix J_c を求めた。

3. 実験結果と考察

Nb/NbTi モジュールの伸線加工性は、適切な中間焼鈍を施すことで良好に保たれる。Fig. 2 に、100 h 保持後の Nb モジュール部の EDS マップを示す。Sn 芯に Ti を添加していた際に Nb モジュール外周に形成されていた NbSnTiCu 化合物の発生は確認されず、Sn が内部まで均一に拡散している様子がわかる。

Fig. 3 に、Ti 添加場所の異なる 3 種類の試料の Matrix J_c を比較した。Nb へ Ti を添加した試料で、高磁界特性が劇的に改善することが確認された。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP23K04453 の助成を受けたものです。

参考文献

[1] T. Morita, T. Yagai, N. Banno, JALCOM 848 (2020) 155465, <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.155465>

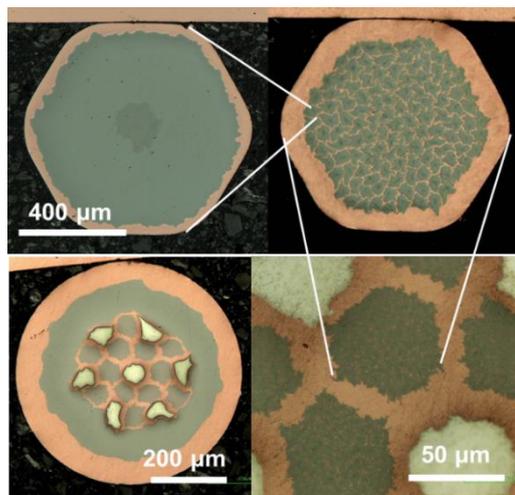


Fig.1. Cross-sectional design for distributed-Sn type Nb₃Sn precursor wires.

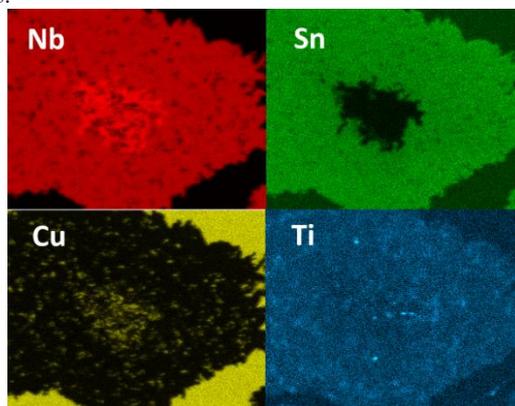


Fig. 2. EDS maps of Nb module after 685 °C for 100 h.

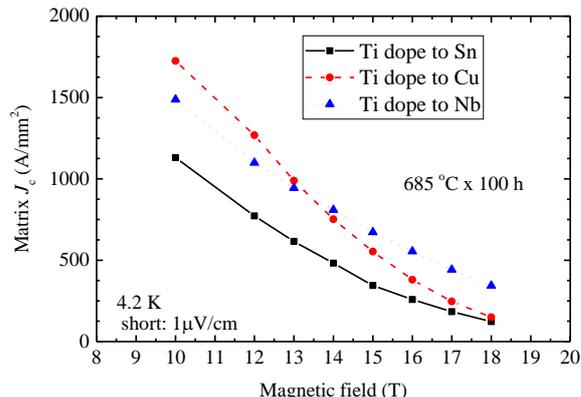


Fig.3. Comparison of Matrix J_c .