

Zn が Nb₃Sn の相形成およびピンニング特性に及ぼす影響

Influence of Zn on phase formation and pinning property in Nb₃Sn

伴野信哉 (NIMS); Mohamed Abdul Basith M (Anna 大学, NIMS); 二森茂樹 (NIMS)
BANNO Nobuya, (NIMS); Mohamed Abdul Basith M (Anna Univ., NIMS); NIMORI Shigeki (NIMS)

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

1. はじめに

Nb₃Sn の高性能化は、核融合用磁石、加速器用磁石、コンパクト NMR 磁石などの最先端高磁場磁石の実現に向けて極めて重要である。元素添加は Nb₃Sn 線材における高 J_c 化を実現するための重要な手段の一つである。今回我々は、高 J_c 化にむけて、Nb₃Sn 相形成時の Sn 拡散挙動およびピンニング特性に対する Zn 組成の影響を調査した。その結果、粒界ピンニングに関する興味深い結果を得た。

2. 実験方法

試料は以下の手順で作製した。まず誘導炉で Cu-Zn を溶解し、塑性加工、切削加工とドリリングでパイプを準備した。それに純 Sn 芯を挿入して Nb パイプを被せ、さらに外側に安定化材となる Cu パイプを被せ、スエージング加工とダイス引き抜き加工で直径 0.6mm の線材とした。次にその単芯線を 7 本束ね、外径 3mm、内径 2mm の Cu 材に挿入し、引き抜き加工で直径 0.92mm まで伸線して 7 芯の試料とした (Fig. 1) [1]。Cu 中の Zn 組成が 10、12、15、20wt% の試料を準備した。また、臨界磁場向上を寄与する Ti の添加は、相形成反応を複雑にするため [2]、添加していない。このうち、20wt%Zn 試料は、加工硬化が著しく断線が多発し線材を作製することができなかった。それぞれ試料名は以下のように名付けた。

- (1) Nb/Cu/Sn: N-C-S
- (2) Nb/Cu-10Zn/Sn: N-10Z-S
- (3) Nb/Cu-12Zn/Sn: N-12Z-S
- (4) Nb/Cu-15Zn/Sn: N-15Z-S

試料は 500°C/100h の予備加熱ののち、650°C×150h、もしくは 685°C×100h の熱処理を施して Nb₃Sn 層を生成した。超伝導層当たりの J_c は、QuantumDesign 製 PPMS に付随した VSM で測定した磁気モーメントを、あらかじめ画像解析により得た Nb₃Sn 層の面積、試料体積から導出した。さらに J_c からピンニング力を、クレマープロットから臨界磁場を導出した。VSM 測定では、長さ 30mm の線材を内径 2mm のスパイラル状に巻いた小コイル試料を用いた。また Nb₃Sn 結晶粒径は、破断面から特定領域の粒子をカウントし見積もった。層厚は反応層研磨面の SEM 像から測定した。

3. 実験結果と考察

Nb₃Sn 層厚は、Zn 量の増加に伴い増加する傾向が見られた。臨界磁場も同様の傾向を示した。Fig. 2 に、Zn 組成を変化させたときの磁束ピンニング力の磁場依存性を示す。最大ピンニング力は Zn 濃度増加に伴い減少傾向が見られた。一方、Nb₃Sn 結晶粒径は、10wt%Zn の添加において大幅な縮径が見られたのち、Zn 濃度とともに増加する傾向が見られた。Fig. 3 に、Zn 組成に対する Nb₃Sn 結晶粒径と最大ピンニング力の相関を示す。Nb₃Sn 多結晶層の主要な磁束ピン止め点は結晶粒界である。しかし Zn 量 0~10% ではその相関がみられないことがわかった。これは粒界での要素ピンニング力が変化していることを示唆している。

この要因として、粒界における Cu 濃度、粒界傾角の影響などが考えられるが、今のところ Cu 濃度との相関が相対的に強くみられる。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP23K04453 の助成を受けた。

参考文献

- [1] K. Asai, T. Yagai, N. Banno, IEEE-TAS (2025) 6001505, <https://doi.org/10.1109/TASC.2025.3539266>
- [2] N. Banno, Superconductivity 6 (2023) 100047, <https://doi.org/10.1016/j.supcon.2023.100047>

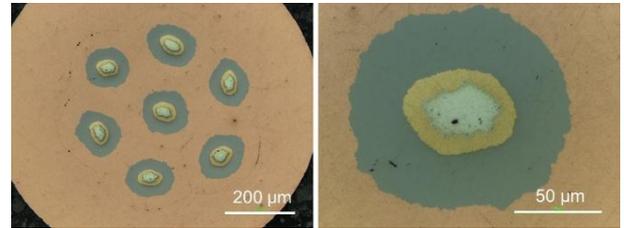


Fig.1. Cross-sections of unreacted 7-core Nb₃Sn wires (N-15Zn-S).

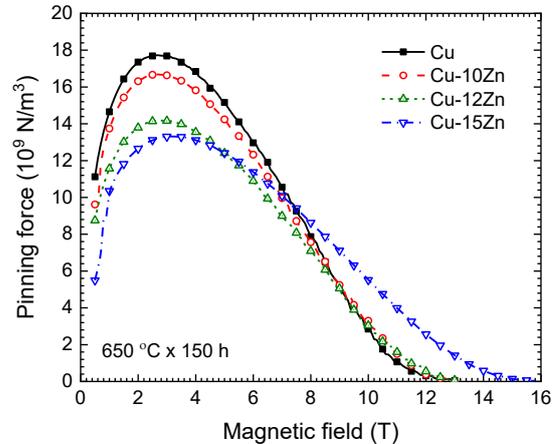


Fig. 2. Pinning force vs. magnetic field for the samples heat-treated at 650°C for 150 h.

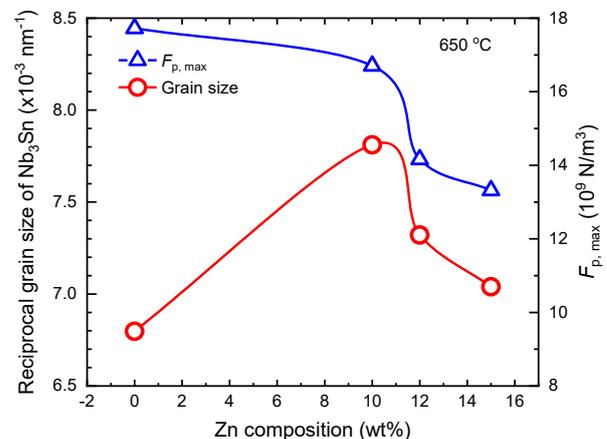


Fig.3. Reciprocal grain size of Nb₃Sn and maximum pinning force vs. Zn content for the samples heat-treated at 650°C for 150 h.