

Nb₃Sn線材の展望 Prospect of Nb₃Sn wire

淡路 智
Satoshi Awaji

東北大学 金属材料研究所
Institute for Materials Research, Tohoku University

1. はじめに

Nb₃SnはNbTiに次ぐ実用超伝導線材として知られ、多くの強磁場用超伝導マグネット及びそれを用いたNMRなどの超伝導機器に使用されている。核融合関連でも、現在フランスに建設中の国際熱核融合実験炉(ITER)に、多量のNb₃Sn線材が用いられている。超伝導線材は、その磁場中臨界電流密度 J_c 特性により、利用できる磁場領域が概ね決まっている。図1には、各実用超伝導線材の磁場中 J_c をまとめた。ここで示した J_c は、安定化材を除いた断面あたりに流れる電流密度ということで、non-Cu J_c と呼ばれている量である。Bi2223線材だけは、Agが安定化とシースを兼ねているので、コア部分の断面積で割ったcore- J_c を示している。図から分かるように、 J_c が交差する点を使用領域とすれば、10T以下はNbTi、17-20T以下がNb₃Sn、それ以上が高温超伝導材料という位置づけになり、実際も概ねそのようになっている。核融合では、12-15Tの間で用いられるため、Nb₃Snが採用されている。

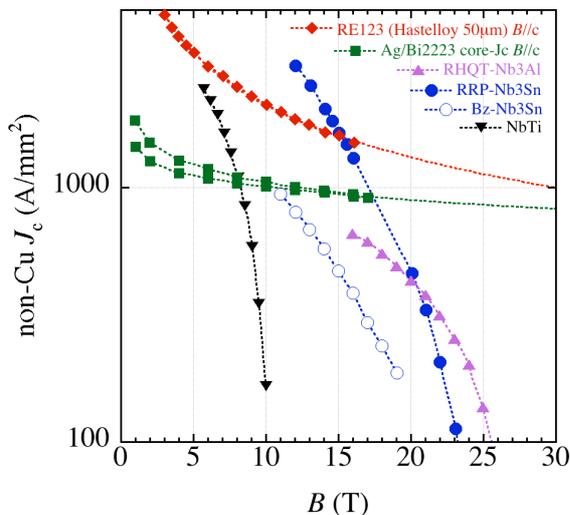


Fig. 1 Non-Cu J_c of various practical superconducting wires.

2. Nb₃Sn線材開発の現状

実用Nb₃Sn線材は、世界各国の多くの線材メーカーから販売され、その多くはブロンズ法と内部拡散法の2種類に大別される。日本では現在、ほぼブロンズ法に偏っている。一方で、海外では内部拡散法を改良したRod Restacked Process (RRP)法が米国のOIST(Oxford Instruments Science and Technology)社で用いられ、高いnon-Cu J_c が実現できている(図1)。ドイツのBruker社はこれとは別にPowder-in-tube (PIT)法を発展させ、こちらも高い臨界電流密度の線材が得られている。

これらNb₃Sn線材の作製技術には、太刀川氏が発見したブロンズ法に端を発している。すなわち、ブロンズ法は銅が触媒となり固相拡散反応を促進することを利用して、ブロンズ(Cu-Sn)とNbの反応により、現実的な熱処理時間で実用に足るNb₃Snを生成することができる。一方で、ブロンズ法はCu-Sn化合物を生成せずに固溶できるSn濃度限界が低く、最終的なNb₃Snの体積分率を増やすことが困難であることも知られている。すなわち、Nbの量を増やしてもSnが不足するために化学量論組成のNb₃Snの体積分率を増やすことが難しい。このため、内部拡散法やPIT法では、Snを別に導入することでNb₃Snの体積分率を向上させてnon-Cu J_c を高めている。一般的に、Cuに固溶できるSnの量は15-16wt%であり、それ以上添加すると、Cu-Sn化合物が生成し線引き加工性が著しく低下する。一方で、内部拡散法は金属Snを用いるために加工性が良く、線引き加工した後に1段目の熱処理によって一旦Cu-Sn化合物を生成し、2段目の熱処理でNb₃Snを生成する。Nb₃Snの体積分率を向上するためNbフィラメントの体積分率を上げておくと、フィラメント同士が融合してしまいフィラメントサイズが大きくなってしまいう問題がある。すなわち J_c は向上するが、有効フィラメント径が非常に大きくなってしまふ。これを避けるために拡散バリアで囲われたサブバンドルを作製し、これを一つのフィラメントなるよう構成する。このため、この方法ではフィラメントサイズをブロンズ法のようにミクロンオーダーにする

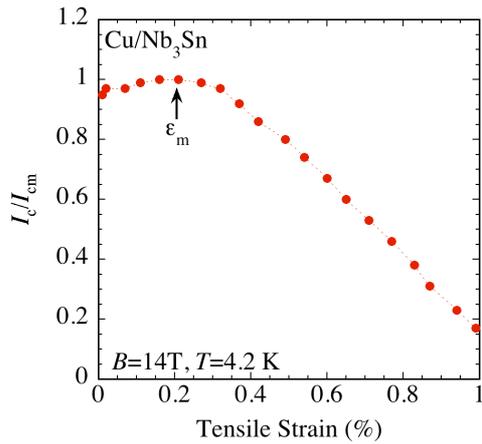


Fig. 2 Strain dependence of J_c in Nb_3Sn wire.

ことが難しく、 J_c を高く保ったまま有効フィラメント径を下げるのが内部拡散法の最大の課題となっている。内部拡散法のうち、極端にCuの体積分率を減らした方法がRRPである。これにより飛躍的に Nb_3Sn 量を増やすことができ、高 J_c に繋がっている。図1に示した2種類の Nb_3Sn 線材のうち、RRP- Nb_3Sn が高い磁場中 J_c を示しているのは、このためである。現在、CERNが計画を打ち出した次世代円形加速器(FCC)では、 Nb_3Sn の J_c を16Tで $1500A/mm^2$ 以上を目標としているので、各線材メーカーはこれに向けて、高 J_c 化を進めている状況である。このため、この数年で、 Nb_3Sn 線材の J_c 特性はさらに向上すると見込まれる。

2. Nb_3Sn 線材の機械特性

$NbTi$ と比べて強磁場特性の優れた Nb_3Sn 線材は、一方でひずみに弱いことが知られている。線材の軸方向にひずみを印加すると、図2に示すように、ドーム型のひずみ依存性を示す。基本的に立方晶である Nb_3Sn は、ひずみによって結晶の対称性が下がることで、超伝導特性を落とす。このため、最も対称性の高いひずみゼロの状態では、最大の J_c をとる。しかし、複合材である Nb_3Sn 線材は、各構成材料との熱収縮率の違いによる発生する熱ひずみのため、 J_c がピークをとる位置がずれる。ピークとなるひずみの値 ϵ_m が、概ね Nb_3Sn の残留ひずみに相当する。このような状況で、線材に補強材を配置した高強度 Nb_3Sn 線材の開発も行われている。図3に、高強度 Nb_3Sn 線材における J_c の応力依存性をまとめた。補強材の高い機械特性（応力-ひずみ関係）によって同じひずみに対する応力が向上するため、 J_c の応力ひずみ特性は、高応力側に伸びている。結果として、より高い応力まで高い J_c を保つことが可能となり、高電磁力下で利用することができる。図中のCuNb/Nb₃Sn線は、最近開発された25T無冷媒超伝導マグネットに利用され、250MPaの高電磁力下でも問題無く運転さ

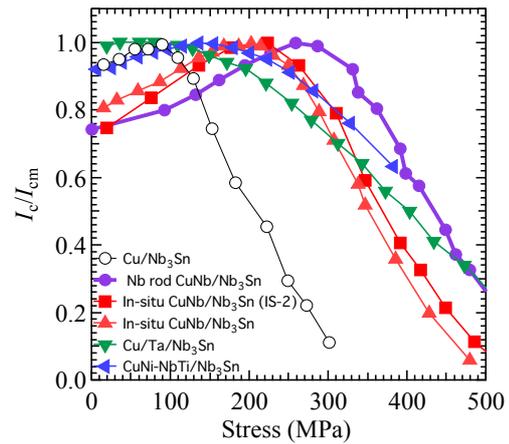


Fig. 3 Stress dependence of J_c in high strength Nb_3Sn wires.

れている。

4. 核融合における Nb_3Sn 線材の状況

国際熱核融合実験炉 (ITER)では、 Nb_3Sn 素線をコンジットに詰めたCable-in-Conduit(CIC)導体が採用されている。これは、大電流を高磁場中で流したときに発生する大きな電磁力に耐えるためであり、Conduit内部に流れる超流動ヘリウムによる高い冷却安定性も大きなメリットである。一方で、Conduitと Nb_3Sn 素線の熱収縮差による大きな圧縮ひずみのため、大きく低下した J_c で設計せざるを得ない点が問題の一つとして認識されている。ITERでは電磁力によるひずみと熱ひずみを合わせて約-0.7-0.55%の軸方向ひずみが想定されている。さらに、素線には軸方向の応力の他に巨大な電磁力によって横方向の圧縮応力が印加され、より厳しい条件で用いられることとなる。このため、 J_c が大きく劣化した条件で用いることになり、効率の悪い使い方をしている。これらを改善した設計ができれば、 Nb_3Sn 線材の特性を有効に用いることが可能となる。原型炉では、さらに磁場と電磁力共に大きくなると想定されるため、熱ひずみを含めた応力/ひずみの設計が重要となると予想される。高強度線の活用や、熱処理済み線材をコイルに巻くリアクト&ワインド法の採用などを、再検討することが重要と考えられる。

4. まとめ

Nb_3Sn 線材はすでに多くの超伝導応用機器に採用されているが、機械特性・臨界電流特性など、まだまだ伸びしろがある。特に、近年の高強度線材の開発により、これまでは難しいと考えられてきた熱処理済み線を巻線するリアクト&ワインド法も可能となってきた。今後のさらなる特性改善と普及が期待できる。