

高磁場用 Nb₃Sn 線材開発

株式会社 神戸製鋼所 技術開発本部

川嶋 慎也

1. はじめに

Nb₃Sn は、上部臨界磁界 (H_{c2}) が 4.2 K では 26 T 付近となり、10 T 以上の磁場領域で高い臨界電流密度 (J_c) を有することから、NMR や国際熱核融合実験炉 (ITER) 用などの高磁場超電導マグネット用の線材として広く使用されている。

神鋼グループは、量産に適した Nb₃Sn 線材としてブロンズ法を採用し 15-16 wt% の高 Sn 濃度ブロンズ法 Nb₃Sn の量産にいち早く成功した。さらにこの成果は高磁場 NMR マグネットの開発や ITER 用コイル開発にも貢献している。加えて、23T 以上の磁場を発生する 1 GHz 級の超高磁場 NMR マグネット向け線材として TS-PIT 法線材の開発を進め、実用的な特性を満足することを示した。近年神鋼グループは、次世代の大型加速器などへの適用を目指し、従来の開発で得られた成果を活用し、分散 Sn 法 Nb₃Sn の開発を行っている。開発したそれぞれの線材断面と J_c を図 1、図 2 に示す。

超電導応用装置の実現においては、適用する装置に応じて、 J_c 、RRR (残留抵抗比)、機械的強度、交流損失などの特性を向上させた Nb₃Sn 線材が開発されている。これらのうち、 J_c は最も基本的な特性であり、この値が向上することで、高磁場が発生できるほか、超電導マグネット自体のコンパクト化も可能となる。

J_c を高くするための主要要因として、線材中の Nb₃Sn 相の生成量 (面積比率)、結晶粒径 (結晶粒界)、化学量論組成の 3 点が挙げられる。このうち、線材断面中の超電導相面積の増大は J_c 向上に直結する。例えば、ブロンズ法では Cu-Sn 合金

中の Sn 濃度増加量に合わせて、線材断面中の Nb 芯面積率を調整し、熱処理後の Nb₃Sn 生成量を増やすことが可能である。

次に、Nb₃Sn 相の結晶組織も J_c に対して大きな影響を及ぼす。Nb₃Sn 相の磁束ピン止め点は Nb₃Sn 結晶粒界であるため、微細で等軸な結晶粒である場合に高 J_c 特性が得られる。結晶粒径は Nb と Sn の濃度比や熱処理条件などによって変動する。

さらに、Nb₃Sn 相の組成は、特に 18 T を超える高磁場領域において J_c との関係が強い。高磁場領域の J_c 特性向上に関しては、Nb₃Sn 相への第 3 元素 (Ti や Ta) の添加や化学量論組成に近づけるための高温熱処理などが実施されている。

以下、各製法についての性能を詳細に述べる。

2. ブロンズ法 Nb₃Sn

高磁場化での高 J_c 化を図る上で、Cu-Sn (ブロンズ) 合金中の Sn 濃度の増加、Nb₃Sn の臨界磁場の向上のために、Ti 添加ブロンズを用いた Nb₃Sn 線材の開発を行った。Sn 濃度増加による加工性の課題に対しては、断面設計に加えて加工条件や焼鈍条件等のプロセス適正化によって対応し、高 Sn 濃度 Cu-Sn-Ti 合金を用いた Nb₃Sn 線材開発に成功した。12 T の J_c は 750 A/mm² 程度である。一方、Nb-Sn 拡散反応後の母材はボイドも少なく、ほぼ Cu で母材面積が占める割合の大きさから、0.2 % 耐力は Cu 比 0.3 の一般的な断面構成で 190 MPa 程度と J_c と強度のバランスが取れた線材と言える。2000 年代には 22T 前後の定常磁場を発生する

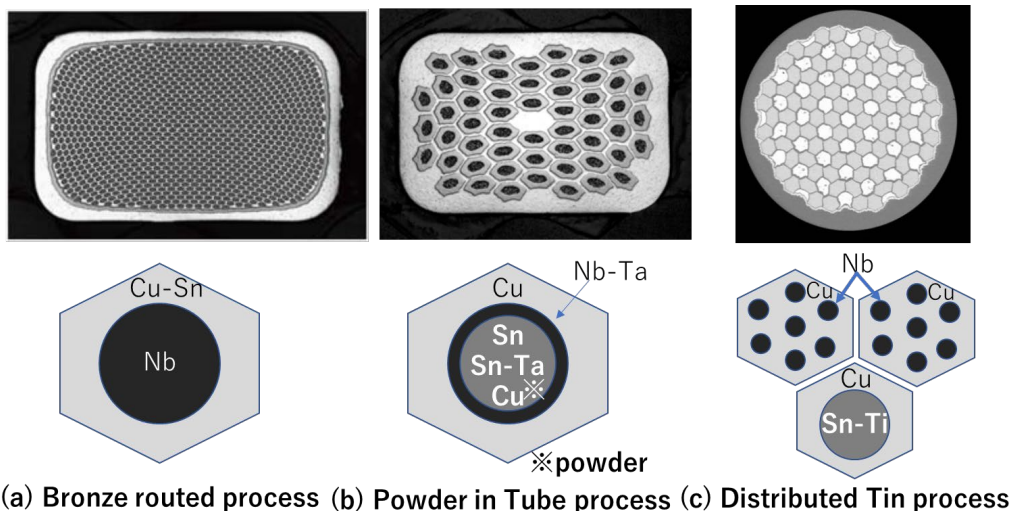


図1 各種Nb₃Sn線材の断面SEMと芯材構成

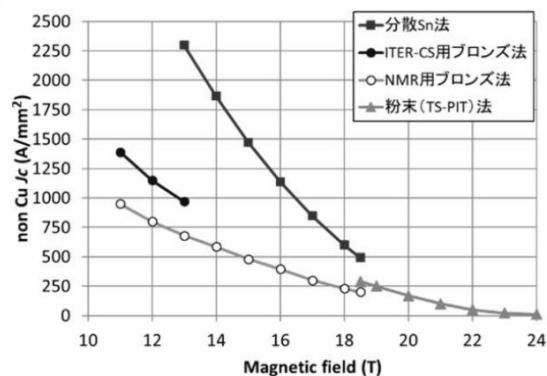


図 2 Jc – B 特性

高磁場NMRマグネットの開発に貢献している¹⁾。

さらに高磁場NMR用途に開発した技術の中磁場用途ブロンズ法Nb₃Sn線材にも展開している。ITER用Nb₃Sn線材は、トロイダル磁場 (TF) コイル用線材と中心ソレノイド (CS) コイル用線材の2種類があり、共に12T付近の磁場領域で使用される。ITER用Nb₃Sn線材には15~16wt%SnのCu-Sn合金を用い、さらにJc向上のために従来のNMR用よりもNb芯を細径化してNb₃Sn相の反応を促進し、熱処理条件についても最適化を行なった。4.2 K、12 TにおけるJcとしてTFコイル用：約900 A/mm²、CSコイル用：1,177 A/mm²という、ブロンズ法としては極めて高いJc を達成している。

3. 粉末法 Nb₃Sn

粉末法Nb₃Sn 線材は、Nb合金チューブの内部にSn を含む粉末 (純Sn、Sn 合金、Sn 化合物) を充填し、その外周にCu を配置したものを複数束ねた断面形状である。Ta-Sn粉末を用いたパウダーインチューブ法 (TS-PIT法) では、Ta およびSn 粉末をモル比6 : 5 の割合で混合し、950 °C、10 時間の熔融拡散熱処理を施した上で粉碎しコア粉末とし、さらにNb₃Sn 生成反応を助長するCu粉末が混合する。

商業規模に近い重量50 kg クラスのTS-PIT 法Nb₃Sn 線材を製作し、量産性と全長での特性安定性を評価し、4.2 K、18.5 T におけるJc = 295 ± 10 A/mm²という結果が得られ、長手方向での特性が均一であることを実証した²⁾。また、その他の特性として残留抵抗比RRR=289、4.2K での0.2%耐力が168 MPa であることも確認し、これらの特性はブロンズ法Nb₃Sn 線材と同等の値であり、TS-PIT 法Nb₃Sn線材が実用的な特性を満たすポテンシャルを持つことを実証した。

4. 分散 Sn 法 Nb₃Sn

欧州原子核研究機構の計画する次々世代粒子加速器 (Future Circular Collider (FCC)) マグネット向け Nb₃Sn は、非常に高い Jc の線材が大量に使用される³⁾。そこで当社グループは内部拡散法の一つである分散 Sn 法 Nb₃Sn 線材を選択した。分散 Sn 法は、Cu マトリクス中に複数の Nb 芯が埋め込み配置された Nb モジュールと Cu マトリクス中に Sn 合金が埋め込まれた Sn モジュールとを組み合わせて製作される。これまでに、Sn 拡散距離低減による拡散状況の改善、Ti 添加量の制御により、4.2 K、16 T における Jc = 1,100 A/mm² を達成し、ブロンズ法と比較して、約 3.8 倍に改善し、他社のトップクラスの線材に匹敵するレベル (Jc = 1,200 ~ 1,300 A/mm²) まで向上出来た。FCC 仕様の 16 T で 1,500 A/mm² に向けては、第 4、5 元素添加による Nb₃Sn 結晶粒のさらなる微細化による高 Jc 化に取り組んでいる。

その他の特性として残留抵抗比 RRR = 350、4.2K での0.2%耐力はCu比が0.3で約130 MPa であることを確認している。標準的なブロンズ法 Nb₃Sn 線材と比較し、大きく劣るため、今後の改善には Ta 補強などを検討している。

5. まとめ

NMR や ITER、粒子加速器など高磁場マグネットへの適用を目的として3種類の製法を適用した Nb₃Sn 線材の高 Jc 化開発を行ってきた。NMR 向けや ITER 向けに量産に成功しているブロンズ法 Nb₃Sn に加え、ブロンズ法での Cu 中の Sn 固溶限界の問題が発生しない粉末法や分散 Sn 法でさらなる高磁場中でブロンズ法を凌駕する性能を得られることを実証した。当社グループでは、今後も超電導マグネットの高磁場化やコンパクト化の進展を支える Nb₃Sn 線材の高 Jc 化を進めていきたいと考えている。

6. 参考文献

- 1) T.Kiyoshi, et al.: "Operation of 930-MHz High-Resolution NMR Magnet at TML," IEEE Transaction on Applied Superconductivity," **15** (2005) 1330-1333
- 2) 財津享司ら：「Ta-Sn パウダー・イン・チューブ法(Nb,Ta)₃Sn 超電導線材の開発」, 低温工学 **43** (2008) 15-22
- 3) A. Ballarino and L. Bottura: "Targets for R&D on Nb₃Sn Conductor for High Energy Physics," IEEE Trans. Appl. Supercond. vol. 25, no. 3.