

内部マトリックス補強によるNb₃Sn線材の機械強度特性の向上 Improvement of mechanical strength on Nb₃Sn wires due to the internal matrix reinforcement

菱沼 良光¹⁾、小黒 英俊²⁾、谷口 博康³⁾、淡路 智⁴⁾、菊池 章弘⁵⁾
Yoshimitsu Hishinuma¹⁾, Hidetoshi Oguro²⁾, Hiroyasu Taniguchi³⁾,
Satoshi Awaji⁴⁾ and Akihiro Kikuchi⁵⁾

1) 核融合研、2) 東海大学、3) 大阪合金工業所、4) 東北大金研、5) 物質・材料研究機構
1) NIFS, 2) Tokai Univ., 3) Osaka Alloying Works, 4) IMR, Tohoku Univ., 5) NIMS

磁場閉じ込め核融合炉における超伝導マグネットは、ケーブルインコンジット (CIC) 導体にて製造されている。典型的なCIC導体内部は、複数本のNb₃Sn線材とクエンチ時の電氣的安定性を確保するCu線とを多重に撚り合わせた構造となる。つまり、Nb₃Sn線材は点接触する箇所が多く存在することになり、導体通電時の電磁力は点接触した領域周辺に集中する。一般的に、Nb₃Sn相は機械的に硬くて脆い化合物系超伝導相であり、その臨界電流 (I_c) 特性は応力やひずみに鋭敏で少しの応力やひずみ印加でも I_c 特性は著しく劣化する。ITER調達の導体試験で明らかになった導体特性の劣化はこの機械的脆性が大きな要因であると考えている。今後、印加される電磁力は大きくなることは明白であり、Nb₃Sn線材の機械的強度を向上させる必要がある。Nb₃Sn線材の強度が向上すれば、将来的に“React&Wind”による革新的なコイル巻線も可能となるであろう。そこで、Nb₃Sn線材の線材化プロセスで、最も一般的で且つ汎用されるブロンズ法を見直した。

我々は、Nb₃Sn線材の高強度化に対して、図1に示すようなNb₃Sn相生成後の線材母材金属を固溶強化機構にて強化する「内部マトリックス補強」を開発した。通常の「ブロンズ法」では、Cu-Sn合金母材とNb芯との界面で拡散反応にてNb₃Sn相の生成とCu-Sn合金からCuへの相変態が起こっている。つまり、Nb₃Sn相を覆うように機械的に軟らかいCuが存在するために、外部からの応力やひずみはNb₃Sn相に集中する。一方、「内部マトリックス補強」では、Nb₃Sn相生成後の線材母材は固溶強化によってCu系固溶体に相変態させ、機械強度の高いCu系固溶体がNb₃Sn相を覆うように存在することでNb₃Sn相の保護材として作用することが期待できる。

内部マトリックス補強Nb₃Sn線材の線径方向への圧縮応力を印加した際の許容圧縮応力及び不可逆圧縮応力の比較を表2に示す。許容応力は応力印加前の I_c 特性 (I_{c0}) に対して95%の I_c 特性を示す応力で、そして不可逆応力は応力除荷後に I_{c0} 特性を維持できる応力とした。内部マトリックス補強にて通常のブロンズ法線材よりも格段に高い機械強度特性を示した。これは、図1に示したように残存したIn溶質元素によって固溶強化されたCu系固溶体母材がNb₃Sn相の保護材として作用したと考えている。この手法では、Cu-Sn二元合金から溶質元素を含むCu-Sn三元合金に替えるだけの簡易な手法で高い機械強度が得られた。

本研究は、NIFS核融合工学プロジェクト (UFFF036) 及び科研費基盤B (20H01889) の支援によって行われた。

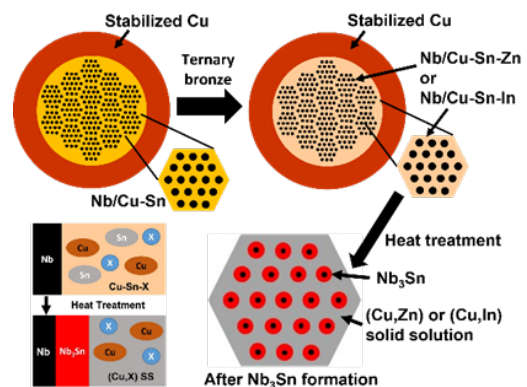


図1 内部マトリックス補強 Nb₃Sn 線材の概要

表1 I_c 特性における許容圧縮応力と不可逆圧縮応力

Sample	Allowable stress $I_c/I_{c0} = 95\%$	Irreversibility stress (100% I_c)
2.0In	51.5	41.3
5.0In	147.9	216.4
16Sn (Ref.)	41.5	20.5