

実用超伝導線材の応力ひずみ効果およびその履歴の影響

Stress/strain characteristics and their hysteretic effect of practical superconducting wire

笠場 孝一¹, 小黒 英俊², 淡路 智²

¹富山大・工, ²東北大・金研

K. Kasaba¹, H. Oguro², S. Awaji²

¹ Faculty of Engineering, University of Toyama

² Institute for Materials Research, Tohoku University

1. 緒言

Nb₃Sn 線材は高い T_c と B_{c2} を持ち高磁界超伝導マグネット用線材として豊富な実用実績を持つが、臨界電流 I_c などの超伝導特性は応力/ひずみに対して、敏感に変化する特徴がある。本研究では内部拡散法およびブロンズ法で作製された ITER(国際核熱融合炉)の TF(トロイダル)コイル用 Nb₃Sn 実導体の、臨界電流に及ぼす応力/ひずみの影響を調べる。なお現在、磁場中での応力/ひずみ効果を測定するための試験ロッドの改良を行っており、その状況も併せて報告する。

2. 実験

高磁場中で、超伝導線材の応力/ひずみ効果を調べる実験は、マグネットボア内の磁場中心に置いた線材に引張り負荷を与えることが出来る図1のようなロッドを用いて行う。ボア径を考えると、試験片全長が短いものしか装着できないため、要求される極低温磁場中での変位測定の精度は非常に高い。測定には複数のひずみゲージを貼ったクリップゲージを用いるが、これらひずみゲージの特性が、温度と磁場の影響で変化する可能性がある。また、実験中はクリップゲージが目視出来

ず、先端のつめ部分の引っ掛かりの安定性など、その状態は不明である。よって、ロッドにはクリップゲージ校正金具が取り付け、実験中にそれらを間接的に検出する。上部からつながる真鍮棒を引っ張ることで、この金具に常に一定量の基準変位を起こすことができる。クリップゲージの片側のつめを、この金具に引っ掛けておくことで、室温時、冷却時、励磁時の、クリップゲージの応答を検出して比較することができる。別途測定している室温でのクリップゲージ校正値を、実験毎にこの金具で測定した、室温時と冷却励磁時の比によって補正し、実験中の変位を算出する。なお、図中右の従来の試験ロッドでは、構造上、試験片を取り換えるたびに、その金具と支えバネを取り外さなければならなかった。一定量の基準変位は、それら部品を再装着するたびに異なった値となる傾向が出てきていた。また、クリップゲージが非対称であることの影響は不明であったが、測定変位の再現性が劣るようになっていた。そこで図中左のように、負荷治具の形状を工夫して、内部空間に若干量の余裕をもたせ、左右対称のクリップゲージを試験片より上部に取り付けられるようにした。この場合、金具や支えバネは試験片装着時も外す必要がない。またクリップゲージは従来の2枚ゲージのものから、4枚ゲージのものへと変更した、その校正係数は、 $2186\mu\epsilon/\text{mm}$ で、従来のものよりも約2倍の感度となった。

本研究では、この改良した試験ロッドを 15T ソレノイド型超伝導マグネットに挿入して、4.2K および 14.5T で実験を行った。臨界電流は4端子法で、線材 1cm あたりに $1\mu\text{V}$ の電圧発生で、 I_c を定義する。負荷を、一定ひずみ毎に止め、それぞれの時点で I_c を測定した。

供試材は ITER に実際に使用される、JASTEC 社製のブロンズ法線材、および中国製の内部拡散法線材 ($n=2, a$ と b) である。ともに周囲の安定化銅と内部導体の比はほぼ 1:1 である。線材断面写真を図2に示す。

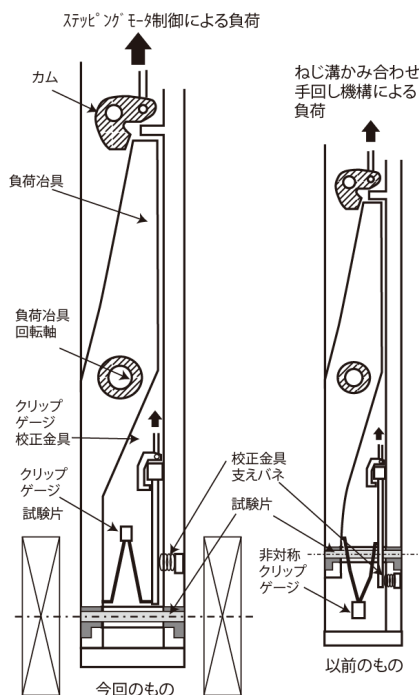
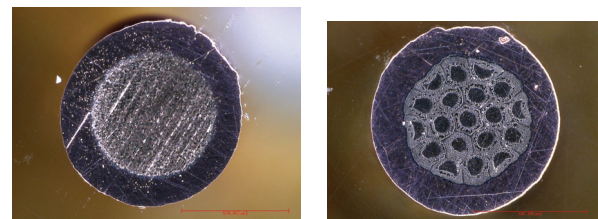


図1 試験ロッド試験片装着部



(a) ブロンズ法

(b) 内部拡散法

図2 線材断面写真

3. 結果および考察

図3に、この試験ロッドから得られた、応力/ひずみ、並びに I_c の劣化挙動を示す。カムとステッピングモータをつなぐステンレス棒の、ロッド内部での摩擦、あるいは負荷治具回転軸の氷結摩擦など、改良ロッドには別の問題があると思われる。そのため、ひずみが発生する前に荷重が先行して発生している。今回は、先行荷重分が線型的に重ねあわされているとして、それを削除した部分を、線材に作用している実荷重として考え、整理した。それを図4に示す。

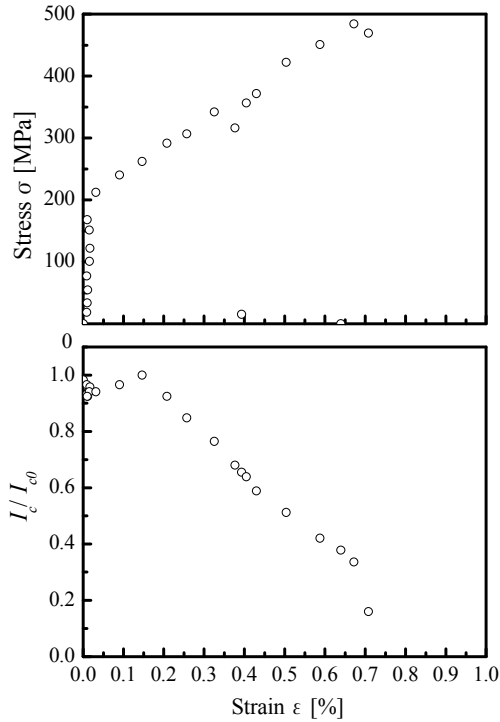


図3 無補正データ(内部拡散法線材 a)

図4には、比較のため以前のロッドで過去に実験したブロンズ法 Nb_3Sn 線材(比較線材 NR, 导体比約 50%)の実験データも示している。全ての線材で I_c は引張ひずみが増加すると徐々に大きくなり、その後小さくなっていく。これはよく知られている現象で、線材を熱処理温度から極低温に冷却するまでの熱収縮差の違いによる、 Nb_3Sn への予圧縮が影響している。よって I_c が最大の I_{cm} となる場所は、線材の固有ひずみが 0 のところである。このひずみを ϵ_m とする。例えば $I_c/I_m = 0.9$ となるひずみを許容限界として $0 < \epsilon < \epsilon_a$ と、それに対応する応力 $0 < \sigma < \sigma_a$ を有効レンジとする。ブロンズ法どうしの比較では、応力-ひずみはほぼ同様の関係を示すが、 ϵ_m の大小の分だけ NR の I_c の劣化が高ひずみ側にあり、 ϵ_a も大きい。しかし、劣化した後の劣化率は同等であった。内部拡散法線材とブロンズ法線材を比較すると、 ϵ_m の値はほぼ等しいが、劣化率は内部拡散法のほうが若干大きく ϵ_a は小さい。一方、 I_{cm} はブロンズ法線材のほうが大きい。内部拡散法は作製技術の進歩によりブロンズを上回る内部拡散法の存在も報告されているが、Sn の

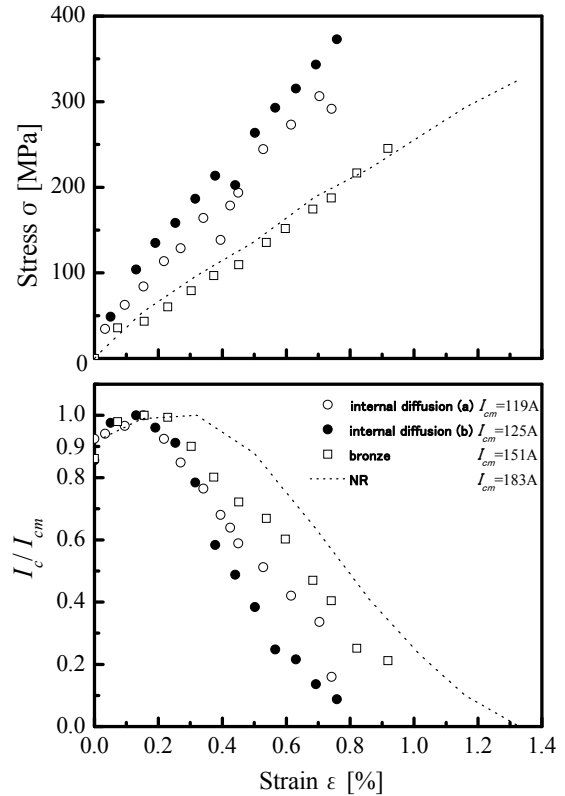


図4 各線材の結果(補正後)

表1 結果データ(図4より)

	内部拡散a	内部拡散b	ブロンズ	NR
ϕ [mm]	0.9			1
I_0 [A]	110	107	130	169
I_{cm} [A]	119	125	151	183
ϵ_m [%]	0.15	0.13	0.16	0.32
σ_a [MPa]	120	158	79	126
ϵ_a [%]	0.24	0.26	0.3	0.47

拡散過程で起こる濃度勾配で、 Nb_3Sn 層が薄くなることがあるとされている。本研究で用いた内部拡散法線材は、 I_{cm} の面、劣化率の面でブロンズ法に及ばない。なお、強度面では内部拡散法のほうが高く、この線材に関しては、そもそもの Nb 含有量が高い可能性がある。

4. 結言

- (1) 両線材ともに一般的な Nb_3Sn 線材と同様、冷却による予圧縮効果が見られたが、そのひずみ ϵ_m は小さく、よって許容ひずみ ϵ_a も若干小さかった。
- (2) 今回の実験ではブロンズ法線材のほうが内部拡散法線材よりも I_{cm} 、許容ひずみ ϵ_a の値が大きく、超伝導性能は高い。
- (3) 一方、機械的強度面では内部拡散法の力が高く、そもそものこの供試材の Nb 含有量が高い可能性がある。