

# 急冷法 Nb<sub>3</sub>Al 複合超電導線の冷凍機冷却における安定性

Thermal stability of RHQT-processed Nb<sub>3</sub>Al wires under the cryocooler-cooled condition

岡山大・工  
物材機構  
東北大・金研

村瀬 暁, 小段 尊則, 七戸 希  
竹内 孝夫, 菊池 章弘, 伴野 信哉  
西島 元, 渡辺 和雄

S. Murase<sup>1</sup>, T. Kodan<sup>1</sup>, N. Nanato<sup>1</sup>  
T. Takeuchi<sup>2</sup>, A. Kikuchi<sup>2</sup>, N. Banno<sup>2</sup>,  
G. Nishijima<sup>3</sup>, K. Watanabe<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Okayama University

<sup>2</sup>National Institute for Materials Science

<sup>3</sup>Institute for Materials Research, Tohoku University

## 1. はじめに

高磁界型マグネット用コイルは励磁中に大きな電磁力を受けるため、巻かれている超電導線には大きな応力・歪が発生する。化合物超電導体の超電導特性は応力・歪に敏感で、これらの増加と共に臨界電流密度( $J_c$ )など低下するが、Nb<sub>3</sub>Al 超電導線はこれらの応力・歪に対して強く、超電導特性の低下の小さいことが知られている<sup>1)</sup>。

一方、超電導マグネットの動向は、運転が容易で、高価な液体ヘリウムの必要のない、冷凍機で冷却される無冷媒マグネットに移り、それらの高磁界化が進んでいる<sup>2)</sup>。特にナノスケールの構造制御技術を駆使して作製された先進金属系超伝導線材である急熱急冷変態法 (RHQT: Rapid-Heating, Quenching and Transformation) による Nb<sub>3</sub>Al 線は、補強材を使用しなくても 20T 以上の強磁場領域を含む全磁場領域で  $J_c$  の高いことが知られている<sup>3)</sup>。

このような強磁場マグネット線材の冷凍機冷却下での熱的擾乱による常電導部の挙動の把握は、超電導マグネットを安定に運転する上で重要である。

筆者らはこれまでに、これに関連してクエンチを起こす熱擾乱エネルギーの最小値である最小クエンチエネルギー ( $MQE$ : Minimum Quench Energy)、発生した常電導部の伝播速度 ( $NZPV$ : Normal Zone Propagation Velocity などについて Nb<sub>3</sub>Sn 超電導線および Nb<sub>3</sub>Al 線に対して研究を行ってきた<sup>4-7)</sup>。これまでに、冷凍機冷却における  $MQE$  は外部安定化銅と増加とともに増加する、Nb<sub>3</sub>Sn 線および Nb<sub>3</sub>Al 線との比較では構成する材質に依存することなどを明らかにしてきた<sup>7)</sup>。

本年度は、昨年度評価したサンプル F3 とほぼ同じ仕様であるが、CICC 導体として大量生産された量産型の ME489 を、今までは測定できなかった 15 T 以上の高磁界で  $MQE$  および  $NZPV$  を評価したので報告する。

## 2. 試料線材および実験方法

サンプルの諸元を Table 1 に示す。試料線材を直径 36 mm の FRP 製ポビンに巻きつけ、円筒上部を GM 冷凍機の第 2 冷却ステージに接触させ、これを磁場印加用超電導マグネットのボア空間に入れ、所定温

度に冷却し磁場を印加した状態で試料線材に電流を流す。この状態で試料に取り付けた熱擾乱投入用ヒータにパルス電流を流して熱擾乱を与える。試料に取り付けた 5 箇所の電圧タップおよび 4 箇所の温度素子 (Cernox 抵抗型温度計) からの信号をデジタルオシロスコープに入力し、その時間変化を測定し、発生した常電導部の挙動を観測する。臨界電流測定での印加した磁場は 8 T から 18 T、設定温度は 5 K から 10 K、熱的安定性測定では、14 から 18 T、5 から 9 K、通電電流 ( $I_{op}$ ) は臨界電流 ( $I_c$ ) の 55 から 70% (負荷率) の各条件で  $MQE$  と  $NZPV$  を求めた。

使用した印加磁場マグネットは、東北大学金属材料研究所強磁場超伝導材料研究センターにあるヘリウム・フリーで世界最高の磁場を発生する 18T-CSM である。

Table 1 Specifications of the RHQT-Nb<sub>3</sub>Al samples

Sample	ME489
Diameter (mm)	1
Cu/non-Cu ratio	1
Diameter of JR filament (μm)	34
No. of JR filament	276
Intra-filament matrix	Ta
Filament core	Ta
Central dummy filament	Ta

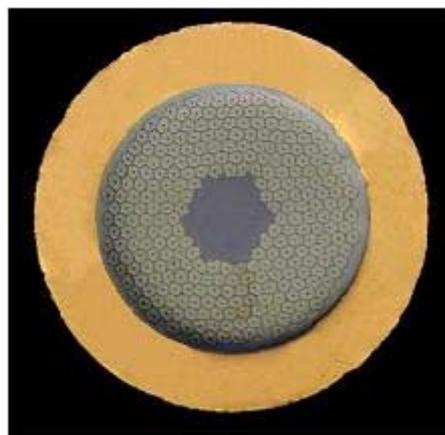


Fig. 1 Cross-sectional view of the RHQT-Nb<sub>3</sub>Al wire (ME489)

### 3. 臨界温度および臨界電流の磁場・温度変化

臨界温度(ゼロ印加磁場)を, 100 mA 通電でサンプルコイル全体の電圧の温度変化を測定する4端子法を用いて測定し, 18.0 K であった.  $\text{Nb}_3\text{Al}$  として一般的な値である. 次に, 臨界電流( $I_c$ )および臨界電流密度( $J_c$ )の温度をパラメータにした磁場依存性を Fig. 2 および Fig. 3

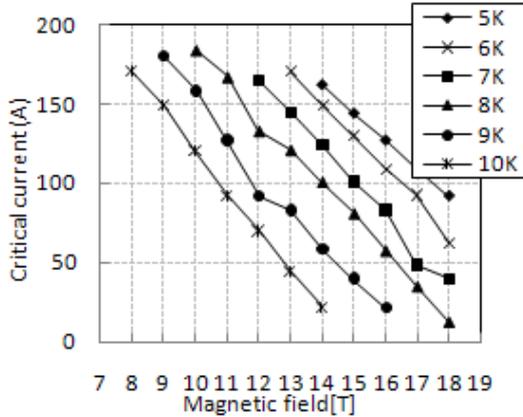


Fig. 2  $I_c$  vs. applied magnetic field of the  $\text{Nb}_3\text{Al}$  wire for temperatures of 5 K to 10 K

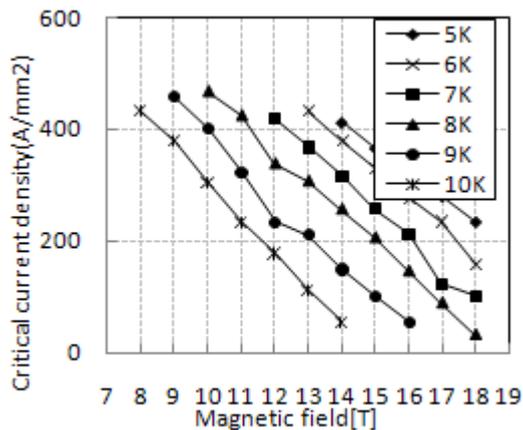


Fig. 3  $J_c$  vs. applied magnetic field of the  $\text{Nb}_3\text{Al}$  wire for temperatures of 5 K to 10 K

に示す. 同タイプ線で異なる条件で熱処理した場合, 4.2 K, 14 T で 328 A であったので, 少し低めである.

### 4. 最小クエンチエネルギー(MQE)

多くのデータの中から温度 6 K, 7 K, 8 K における MQE-電流負荷率の依存性を, 磁場をパラメータにして Fig. 4 に示す. 同様に, 磁場 16 T, 17 T, 18 T における MQE-電流負荷率の依存性を, 温度をパラメータにして Fig. 5 に示す. 負荷率 70% での MQE は約 1 mJ で, 今まで測定した同程度の  $J_c$  をもつ線材(たとえば F3 サンプル)の MQE-負荷率曲線の 70% への外挿値とほぼ一致する. 冷凍機冷却の場合, 同じ温度であれば高磁場ほど MQE が低くなる傾向が得られていた. 今回の結果は, 6 K では同様の結果となったが, 7 K, 8 K では必ずしもそのような傾向は見ら

れなかった. また, 同じ磁場における MQE の電流負荷率依存性では, 7 K の MQE が最も高い傾向を示した. 今回測定した電流負荷率は 60 から 70% で, 従来の 80 から 95% より低い, 原因については今後検討して行く.

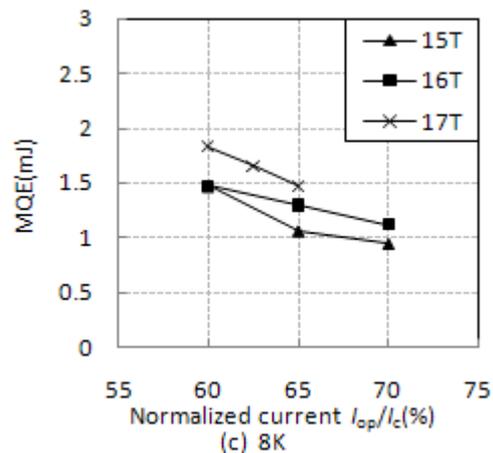
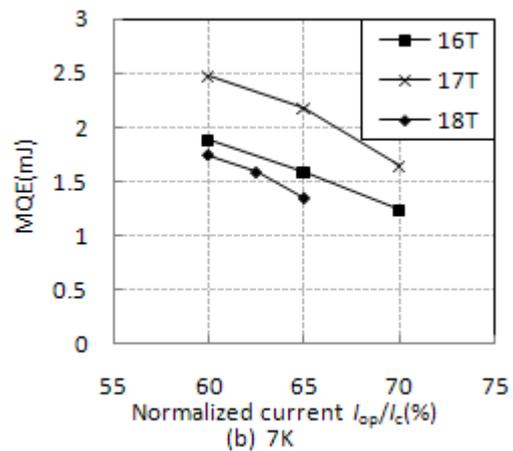
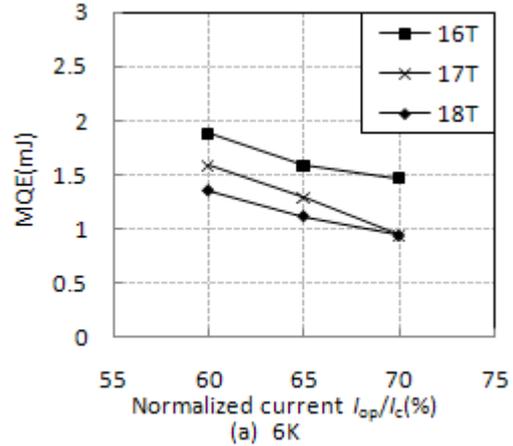


Fig. 4 MQE vs. normalized current of the  $\text{Nb}_3\text{Al}$  wire for temperatures of (a) 6 K, (b) 7 K, and (c) 8 K

$NZPV$ は通電電流密度に支配されていることがわかる。

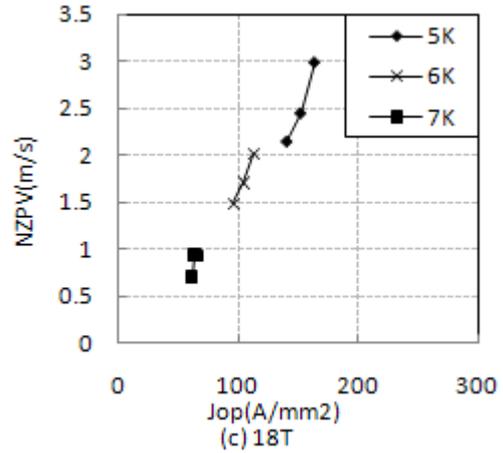
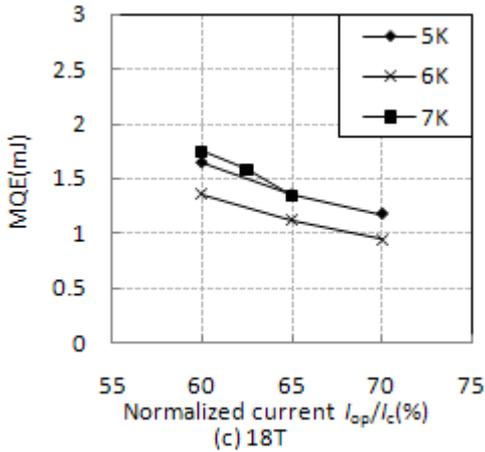
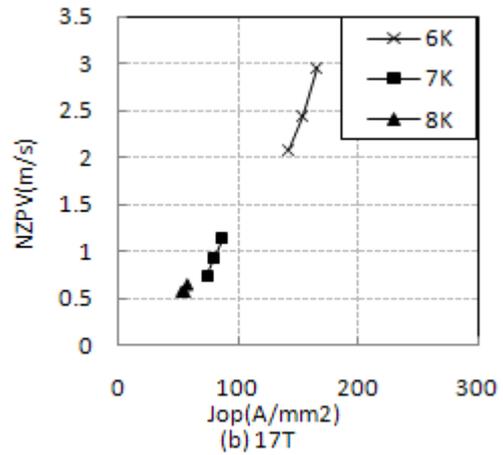
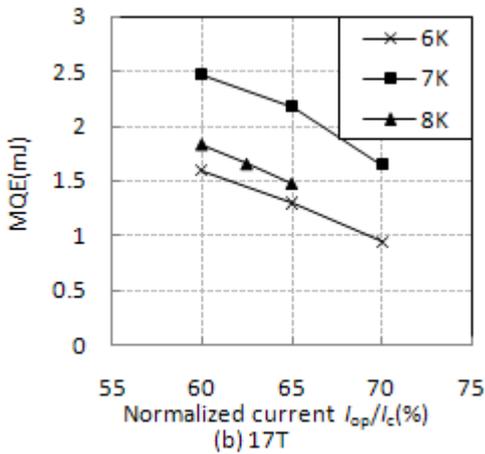
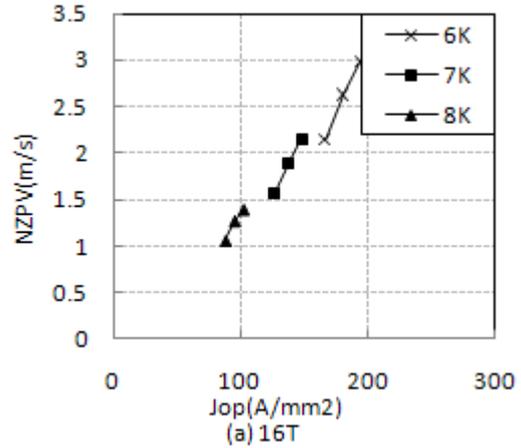
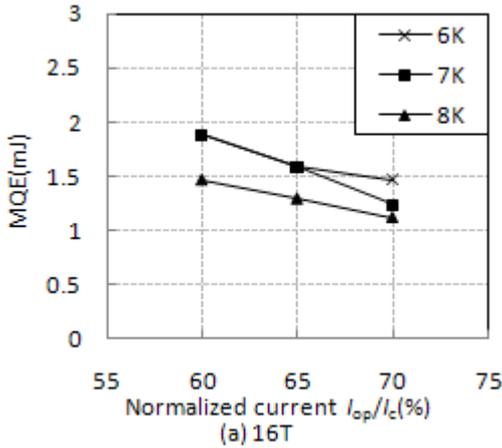


Fig. 5  $MQE$  vs. normalized current of the  $Nb_3Al$  wire for applied magnetic fields of (a) 16 T, (b) 17 T, and (c) 18 T

Fig. 6  $NZPV$  vs. operated current density of the  $Nb_3Al$  wire for applied magnetic fields of (a) 16 T, (b) 17 T, and (c) 18 T

### 5. 常電導伝播速度( $NZPV$ )

各磁場における  $NZPV$  の通電電流密度 ( $J_{op}$ ) 依存性を、温度をパラメータにして Fig. 6 に、各温度における  $NZPV$  の通電電流密度 ( $J_{op}$ ) 依存性を、磁場をパラメータにして Fig. 7 に示す。Fig. 6 において、 $NZPV$  は 200 A/mm<sup>2</sup> で約 1 m/s の値を示した。これは前年度に測定した F3 サンプルとほぼ同じである。15 T 以上においても

Fig. 7 から、同じ通電電流密度であれば磁場の高い方が高い  $NZPV$  を示した。これも昨年度測定した  $Nb_3Al$  線と同じ傾向である。浸漬冷却下での  $NZPV$  を表す(1)式を示す。

$$NZPV = \frac{J_{op}}{\gamma c} \left( \frac{\rho \kappa}{T_c - T_{op}} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{(1-2y)}{(yz^2 + z + 1 - y)^{\frac{1}{2}}} \quad (1)$$

$$y = \frac{hP(T_c - T_{op})}{AJ_{op}^2 \rho} \quad (2)$$

$$z = \frac{Q_L}{\gamma C(T_c - T_{op})} \quad (3)$$

ここで、(2)式  $y$  は定常項、(3)式  $z$  は過渡項である。  $\rho$  は常電導時の比抵抗、  $\kappa$  は熱伝導率、  $\gamma C$  は熱容量、  $T_{op}$  は運転時の温度、  $A$  は断面積、  $P$  は冷却周長、  $h$  は熱伝達係数、  $Q_L$  は単位体積当たりの潜熱を表す。伝導冷却の場合、線材の両端が常に冷却されているため、  $y=z=0$  の断熱の場合とは少し異なった傾向を示すと思われる。

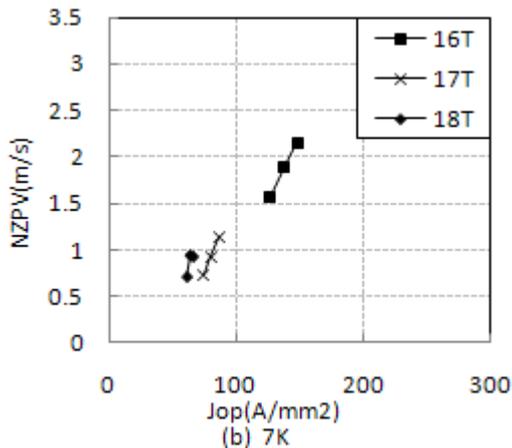
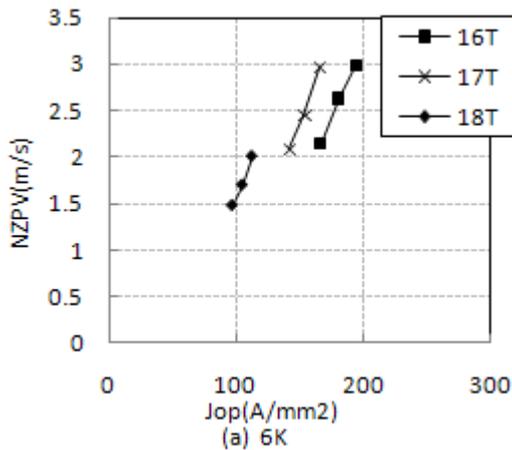


Fig. 6  $NZPV$  vs. operated current density of the  $Nb_3Al$  wire for temperatures of (a) 6 K and (b) 7 K

## 6. まとめ

初めて 16 T 以上の高磁場で熱的安定性を測定した。また、測定治具などの影響で今までより 10% 以上低い 60 から 70% の低負荷率の測定しかできなかった。その結果、昨年度まで測定した 14 T までの中磁場、80% 以上の負荷率に比べて、次の点で異なった結果および同様の結果が得られた。

異なった結果:

- 1) 同負荷率での  $MQE$  の磁場依存性は、従来の冷凍機冷却特有の高磁場ほど  $MQE$  が低くなる傾向には必ずしもならなかった。

同様の結果:

- 1)  $MQE$  の電流負荷率の増加に伴う減少。
- 2)  $MQE$  と  $J_c$  の負の相関
- 3)  $NZPV$  と  $J_{op}$  との正の相関
- 4) 同じ通電電流密度であれば磁場の高い方が  $NZPV$  は高いこと
- 5)  $NZPV$  において、線材両端からの冷却が無視できないこと

## 参考文献

- 1) T. Takeuchi et al., *Appl. Phys. Lett.*, **71** (1997) 122.
- 2) 西島 元他, *低温工学* **41** (2006) 322.
- 3) T. Takeuchi et al., *Supercond. Sci. Technol.*, **13** (2000) R101.
- 4) S. Murase et al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **11** (2001) 3627.
- 5) 山本他: *低温工学* **38** (2003) 262
- 6) K. Watanabe et al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **15** (2005) 3410.
- 7) S. Murase et al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **19** (2009) to be published.