

急冷法 Nb₃Al 複合超電導線の冷凍機冷却における安定性

Thermal stability of RHQT-processed Nb₃Al wires under the cryocooler-cooled condition

岡山大・工 村瀬 暁, 小段 尊則, 七戸 希
物材機構 竹内 孝夫, 菊池 章弘, 伴野 信哉
東北大・金研 西島 元, 渡辺 和雄

S. Murase¹, T. Kodan¹, N. Nanato¹, T. Takeuchi², A. Kikuchi², N. Banno², G. Nishijima³, K. Watanabe³

¹Faculty of Engineering Okayama University

²National Institute for Materials Science

³Institute 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)などが低下するが、Nb₃Al 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¹⁾。

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²⁾。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Nb₃Al 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³⁾。

超電導線に熱的擾乱が発生した場合、その大きさによって常電導部が発生し、それが伝播してクエンチに至る。したがって、発生した常電導部の挙動を把握することは、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Nb₃Sn 超電導線およびNb₃Al 線に対して研究を行ってきた^{4,7)}。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、Nb₃Sn 線およびNb₃Al 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⁷⁾。

本年度は、昨年度評価したCICC 導体として大量生産された量産型のME489について、高負荷率(70-90%)の範囲で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 製ボビンに巻きつけ、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16 T から18 T、設定温度は4.6 K から8.2K、熱的安定性測定では、16T から18 T、5 から9 K、通電電流(I_{op})は臨界電流(I_c)の70 から90%(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-Nb₃Al 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 |

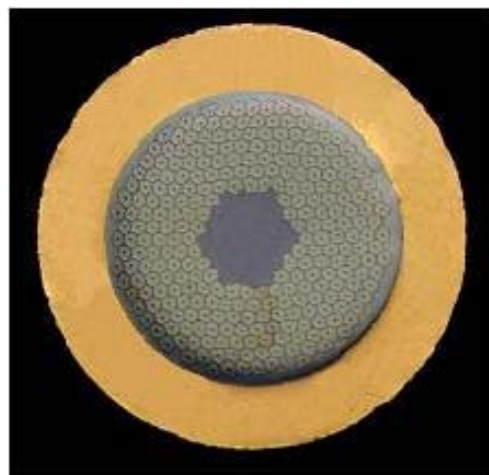


Fig. 1 Cross-sectional view of the RHQT-Nb₃Al wire (ME489)

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, 17.8 K であった. Nb_3Al 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 に示す.

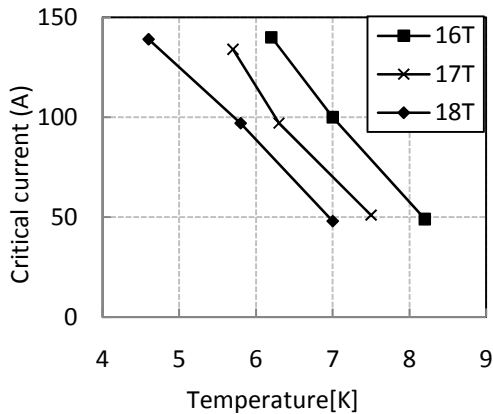


Fig.2 I_c vs. temperatures of the Nb_3Al wire for applied magnetic fields of 16T to 18T

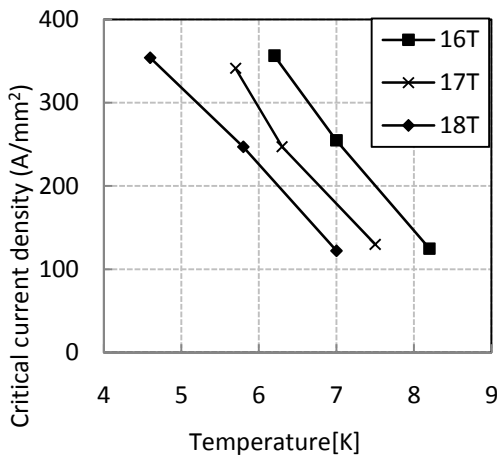


Fig. 3 J_c vs. temperatures of the Nb_3Al wire for applied magnetic fields of 16T to 18T

4. 最小クエンチエネルギー(MQE)

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. 4 に示す. 同様に, 通電電流50A, 100A, 150A付近におけるMQE-電流負荷率の依存性を, 磁場をパラメータにしてFig. 5 に示す. Fig.4 より, 負荷率70%でのMQE はすべて約2mJを示している. 昨年度同じ線材で測定したときは負荷率70%で約1mJを示しており, この差の原因については今後検討していく. 冷凍機冷却の場合, 同じ磁場であれば高温ほどMQE が低くなる傾向が得られており, Fig.4 に示されるように本年度も同様の結果が得られた. これは高温ほど温度マージンが低下することによるものと説明できる. また, 同じ通電電流密度においても高磁場ほど

温度マージンが低下してMQEが低くなるはずである. Fig.5 より50A, 16Tおよび150A, 18Tの2点の結果を除けばその傾向が得られた. Fig.4 およびFig.5 より, 負荷率依存性に関しては, 負荷率を増加させるとMQEが減少している. これも負荷率を増加させると温度マージンが低下するためであると説明できる.

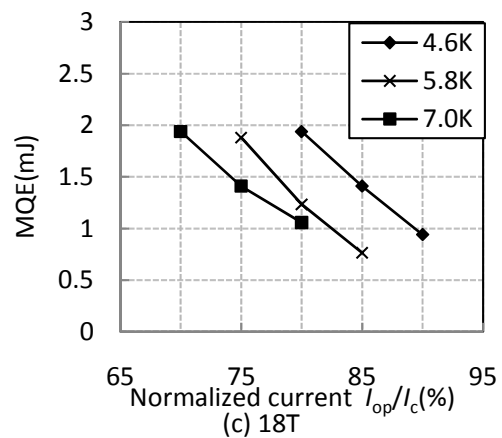
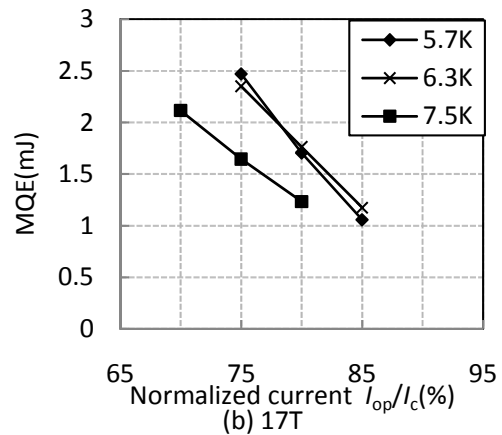
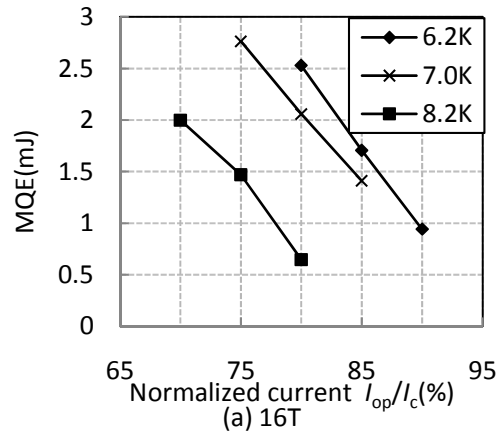


Fig. 4 MQE vs. normalized current of the Nb_3Al wire for applied magnetic fields of (a) 16T, (b) 17T, and (c) 18T

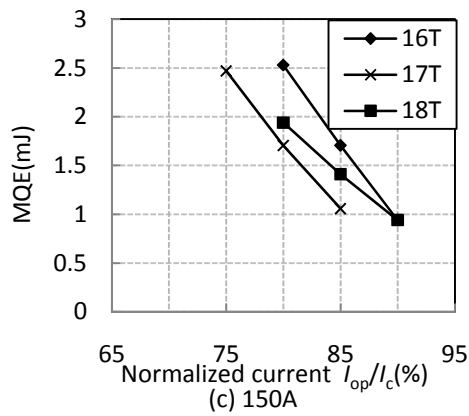
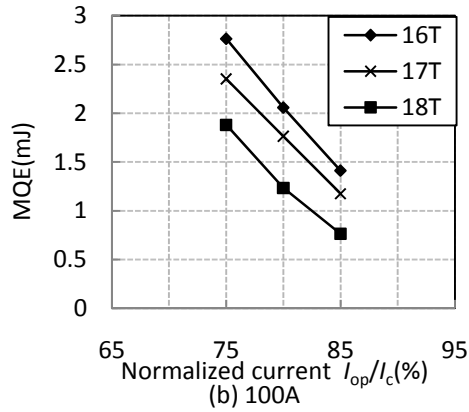
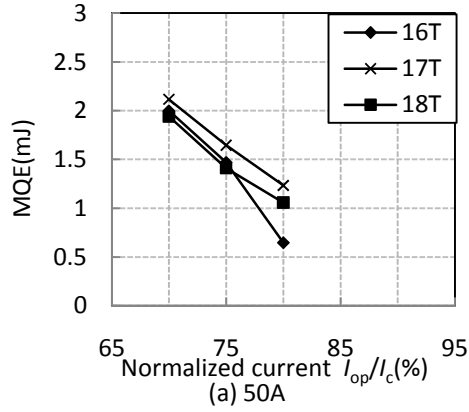


Fig. 5 MQE vs. normalized current of the Nb_3Al wire for transport currents of (a) 50A, (b) 100A, and (c) 150A

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に示す。同様に、通電電流50A, 100A, 150A付近における $NZPV$ 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から、 $NZPV$ は通電電流密度に依存することが分かる。また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。これは過去に測定した Nb_3Al 線と同じ傾向である⁸⁾。浸漬冷却下での $NZPV$ を表す(1)式を示す。

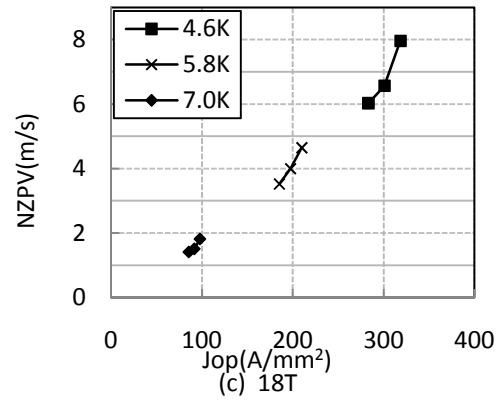
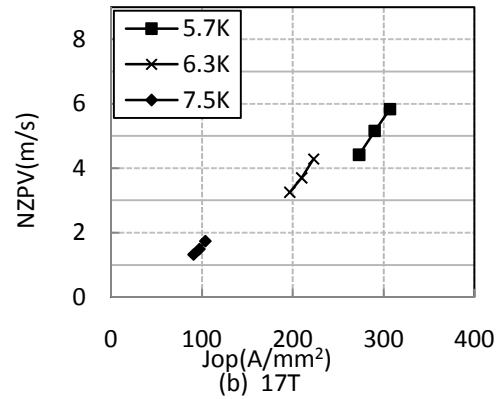
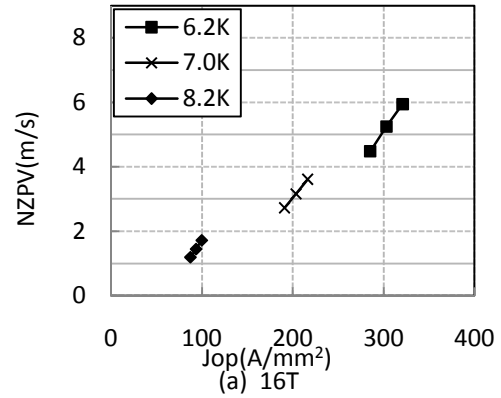


Fig. 6 $NZPV$ vs. operated current density of the Nb_3Al wire for applied magnetic fields of (a) 16 T, (b) 17 T, and (c) 18 T

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

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

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

ここで、(2)式 y は定常項、(3)式 z は過渡項である。 ρ は常電導時の比抵抗、 κ は熱伝導率、 γC 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。

また、(1)式は線材温度および印加磁場が一定ならNZPVは J_{op} に比例することを示している。過去に測定されたNb₃Al線材においてもNZPVは J_{op} に比例することを示しており⁸⁾、今回も同様の結果が得られた。

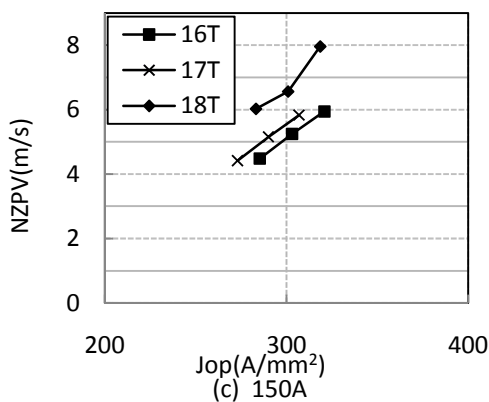
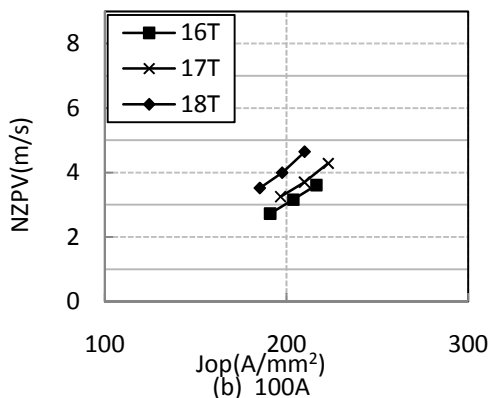
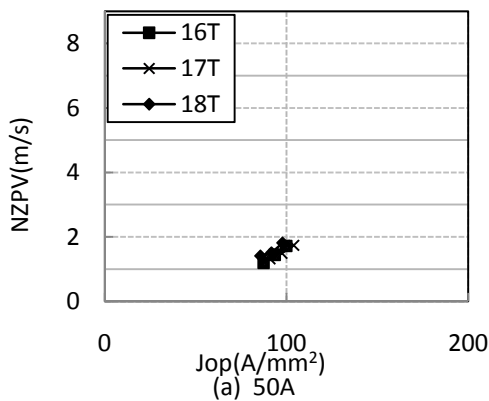


Fig. 7 NZPV vs. operated current density of the Nb₃Al wire for transport currents of (a) 50A, (b) 100A, and (c)150A

6. まとめ

70%以上の高負荷率においても昨年度に冷凍機冷却下において70%以下で測定されたNb₃Al線材と同様にMQEは温度マージンに依存し、NZPVは J_{op} に依存することが分かった。

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.
- 8) 下山雅弘他: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平成19年度年次報告