

銅安定化 Nb₃Al 急冷法複合超電導線の冷凍機冷却における 15 T 以上の高磁界における安定性

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

岡山大学 工学部 村瀬 暁, 小段 尊則, 七戸 希
材料機構 竹内 孝夫, 菊池 章弘, 伴野 信哉
東北大学 金研 小黒 英俊, 淡路 智, 渡辺 和雄

S. Murase¹, T. Kodan¹, N. Nanato¹, T. Takeuchi², A. Kikuchi², N. Banno², H. Oguro³, S. Awaji³, 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)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⁴⁻¹⁰⁾。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、Nb₃Al 線の MQE は線材を構成する材料の比熱、熱伝導率、抵抗値などの物性値より J_c の寄与が大きい、 $NZPV$ は磁場・温度が変化した状態においても通電電流密度に比例することを明らかにした⁷⁾。

昨年度はCICC 導体として大量生産された量産型のRHQT法Nb₃Al線であるME489について安定性を評価したが諸事情でデータ数が限られた。今年度は同じ線材を用い、高磁場(13-18T)、高負荷率(80-95%)の範囲で、さらにデータを増やして MQE 、 $NZPV$ 、 T_m (温度マージン) 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、断面写真をFig. 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。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。試料には電圧タップおよび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。臨界電流測定で印加した磁場は11 T から18 T、設定温度は5.5 K から10 K、熱的安定性測定では13 T から18 T、6.04 K から8.71 K、通電電流(I_{op})は臨界電流(I_c)の80 から95%(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 (μ m)	34
No. of JR filament	276
Intra-filament matrix	Ta
Filament core	Ta
Central dummy filament	Ta

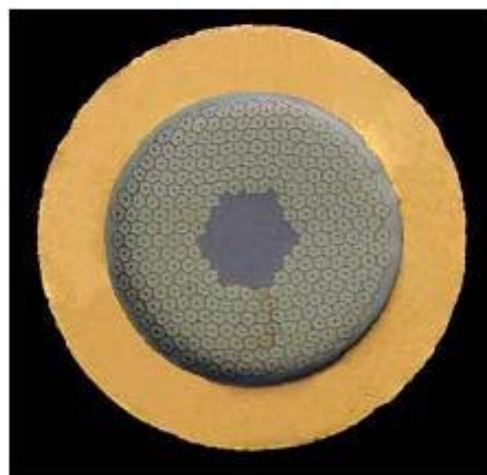


Fig. 1 Cross-sectional view of the RHQT-Nb₃Al wire (ME489)

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. Nb₃Al 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.

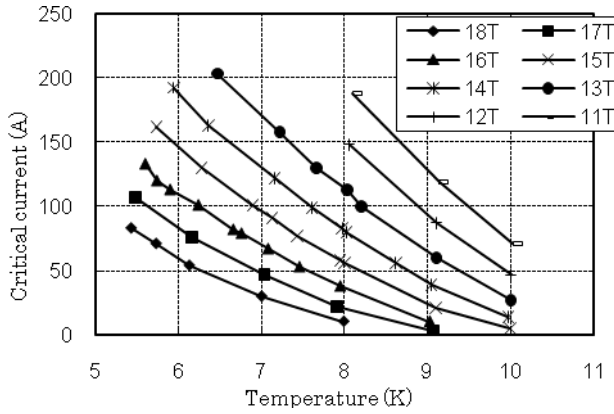


Fig.2 I_c vs. temperatures of the Nb₃Al wire for applied magnetic fields of 11T to 18T

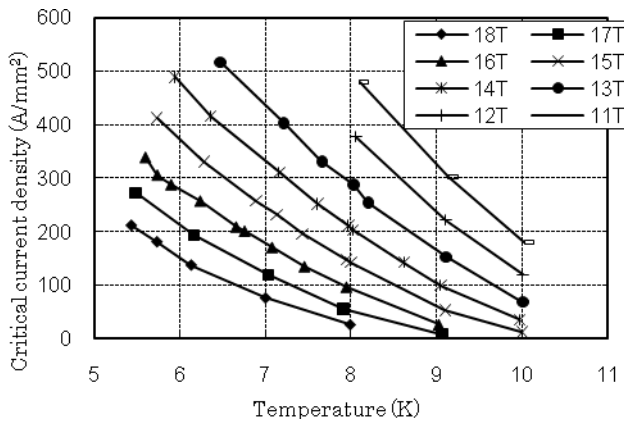


Fig. 3 J_c vs. temperatures of the Nb₃Al wire for applied magnetic fields of 11T to 18T

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(通電電流 I_{op} と臨界電流 I_c の商)の依存性を, 温度をパラメータにしてFig. 4 に示す. 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因るものと説明できる. また, Fig. 4より, 負荷率80%でのMQE は8-17 mJを示している. 昨年度¹⁰⁾同じ線材で測定したときは負荷率80%で0.5 - 2.5 mJを示しており, 大きな差異を生じた. 今回の高いMQEは熱擾乱発生用のヒータから試料線材に十分熱が伝わらなかったことが一因と考えられる. そこで, 今回はMQEではなく, 温度マージン(T_m)の観点から熱的安定性を評価し, 次項に示す.

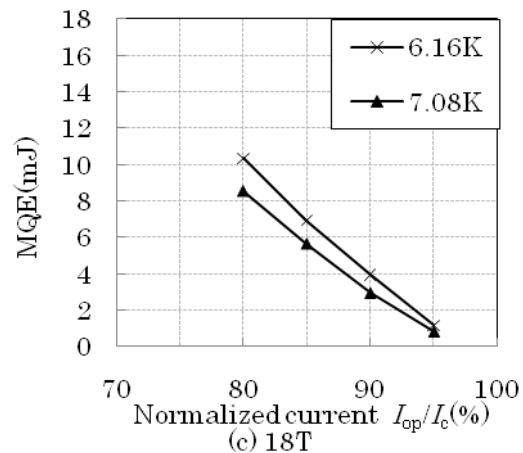
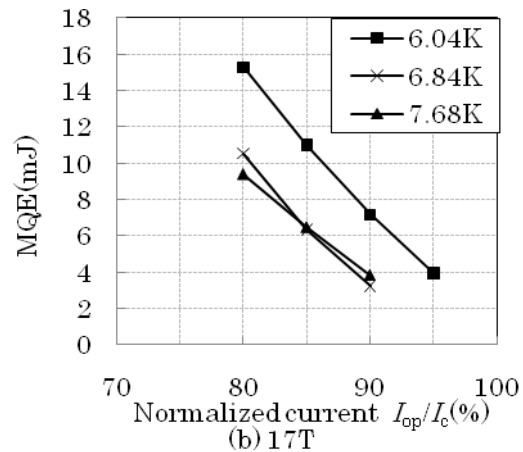
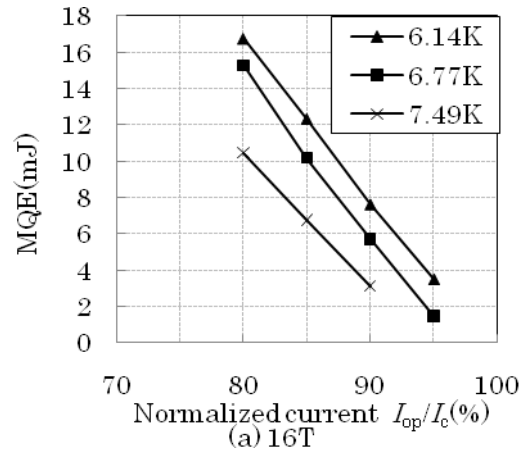


Fig. 4 MQE vs. normalized current of the Nb₃Al wire for applied magnetic fields of (a) 16 T, (b) 17 T, and (c) 18 T

5. 温度マージン(T_m)

温度マージン(T_m)とはある条件(外部印加磁場 B , 温度 T)において通電させたときの試料初期温度から, その条件における臨界温度までの温度余裕を示す指標である. 磁場 16 T, 17 T, 18 Tにおける T_m -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. また, 昨年度¹⁰⁾と今年度における T_m -電流負荷率特性の比較をFig.6 に示す.

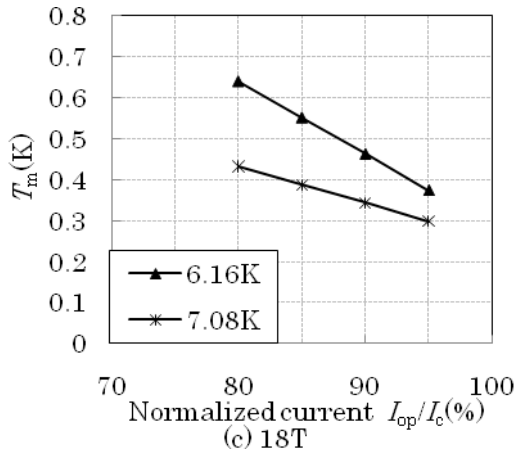
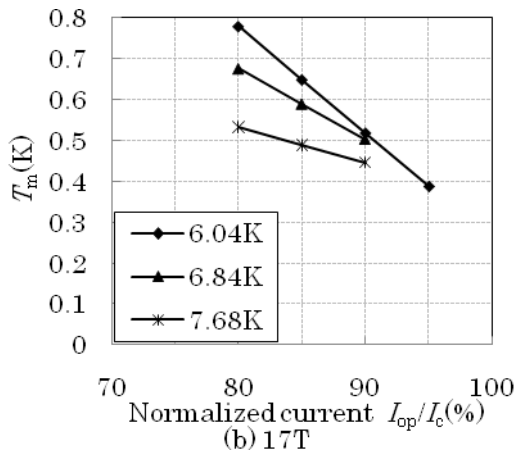
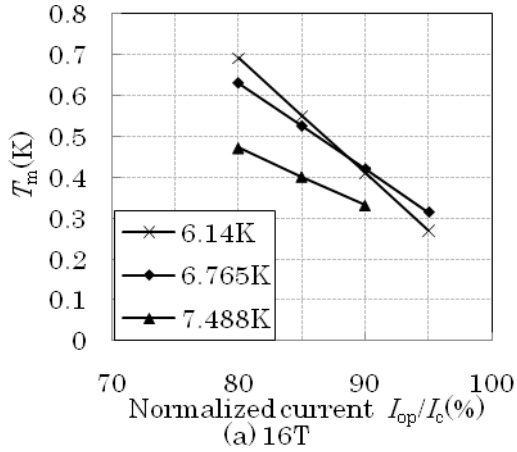


Fig. 5 T_m vs. normalized current of the Nb₃Al wire for applied magnetic fields of (a) 16 T, (b) 17 T, and (c) 18 T

Fig. 5より電流負荷率を増加させると T_m は減少する。これは負荷率が上がると、その時の通電電流(I_{op})における臨界温度(T_{op})が減少するためである。Fig. 6より、 T_m -電流負荷率特性は昨年度と今年度でほとんど差異は見られなかった。 MQE を指標として安定性を評価すると、ヒータから線材への熱伝播の大小で MQE の値は大きく変化するが、 T_m を指標とするとその影響が無いため、非常に有用であると言える。

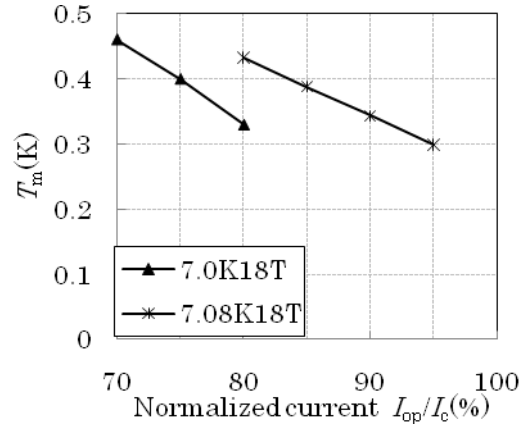


Fig. 6 T_m vs. normalized current of the Nb₃Al wire for magnetic field of 18T and temperatures of 7.0K¹⁰ and 7.08K

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. 7に示す。NZPVは通電電流密度に依存し、これは過去に測定したNb₃Al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¹¹⁾。

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

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

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

$$NZPV = \frac{J_{op}}{\gamma C} \left(\frac{\rho \kappa}{T_{cs} - T_{op}} \right)^{\frac{1}{2}} = \frac{J_{op}}{\gamma C} \left(\frac{L_0 T_{op}}{T_{cs} - T_{op}} \right)^{\frac{1}{2}} \\ = \frac{J_{op}}{\gamma C} \left(\frac{L_0}{T_{cs}/T_{op} - 1} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

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} は運転時の線材温度、 T_{cs} は磁場・電流印加時の臨界温度と発熱(分流開始)温度との平均値、 $L_0=2.45 \times 10^{-8} \text{ W}\Omega\text{K}^2$ はWiedemann-Franz-Lorenz則に従った場合のLorentz number、 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((4)式)とは少し異なった傾向を示

すと思われるが、ほぼ近似できていると考える。

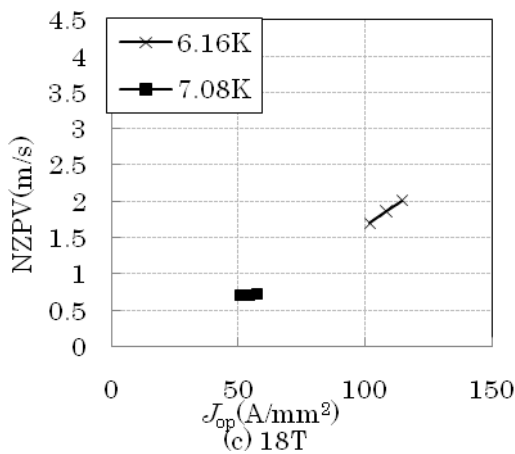
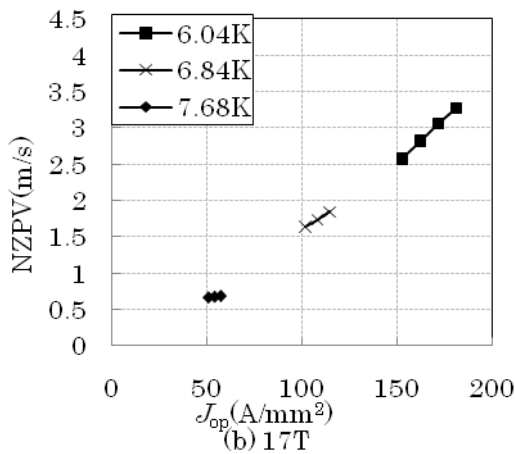
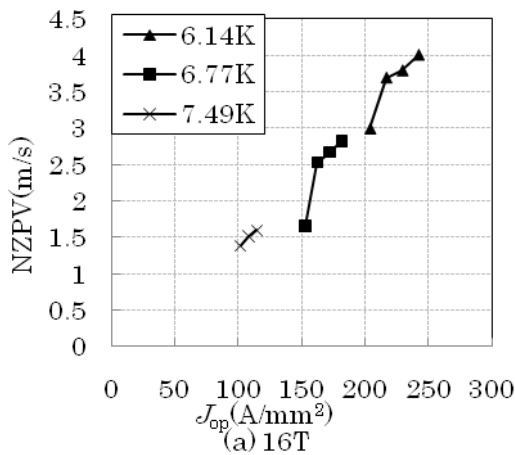


Fig. 6 NZPV vs. operated current density of the Nb₃Al wire for applied magnetic fields of (a) 16 T, (b) 17 T, and (c) 18 T

(1)式および(4)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。

(4)式では同じ線材温度同じ J_{op} の条件において、磁場が変化した場合、(γC が変化しないとするなら)高磁場の方の T_{cs} が下がってNZPVが早くなる。同じ磁場・同じ J_{op} で、線材温度を変えた場合、(γC が変化しないとするなら)高温の方が T_{op} が上がって、NZPVが早くなる。

仮に、MgB₂線¹²⁾とNb₃Al線のNZPVを比較した場合、同じ線材温度、同じ J_{op} の条件において、(γC に大きい変化はないとするなら) T_{cs} が圧倒的に上がってNZPVが遅くなることが考えられる。

6. まとめ

MQE を指標として安定性を評価すると、ヒータから線材への熱伝播の大小で*MQE* の値は大きく変化する。しかし、 T_m を指標とするとその影響は少ない。NZPVは J_{op} に依存した。また、 J_{op} を一定にして温度・磁場などを変えて比較した場合、Lorenz数を用いて断熱状態を仮定すれば多くの実験結果の説明をできるように思われる。

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) 2666.
- 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(2008)
- 9) 村瀬 暁他: 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20年度年次報告(2009) 69.
- 10) 村瀬 暁他: 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21年度年次報告(2010) 64.
- 11) M.N. Wilson, *Superconducting Magnets*, Oxford Science Publications (1983)
- 12) 小段他:2009 年度秋季低温工学・超電導学会, 2P-p17 (2009).