

# 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

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

岡山大・工 村瀬 暁, 下山雅弘, 桑島英行, 佐藤弘道, 七戸 希

東北大・金研 西島 元, 渡辺和雄

NIMS 菊池章弘, 伴野信哉, 竹内孝夫

S. Murase<sup>A</sup>, M. Shimoyama<sup>A</sup>, H. Kuwashima<sup>A</sup>, H. Sato<sup>A</sup>, N. Nanato<sup>A</sup>, G. Nishijima<sup>B</sup>, K. Watanabe<sup>B</sup>,

A. Kikuchi<sup>C</sup>, N. Banno<sup>C</sup> and T. Takeuchi<sup>C</sup>

<sup>A</sup>Department of Electrical and Electronics Engineering, Okayama University

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

<sup>C</sup>National Institute for Materials Science (NIMS)

### 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>。

超電導線を超電導マグネットとして使用した場合、さまざまな擾乱に対して超電導状態が安定に保持できることが要求される。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、クエンチに至り、超電導マグネット全体の温度上昇を招き、焼損などの深刻な事態につながる。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。

報告者はこれまでに、通電中の試料線材にヒータか

ら熱擾乱を投入し線材が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、クエンチ検出とマグネットの保護などの熱的挙動について研究を行ってきた<sup>4-6)</sup>。これまでに、補強型Nb<sub>3</sub>Sn超電導線の冷凍機冷却におけるMQEは外部安定化銅の体積比の増加とともに増加する<sup>6)</sup>、浸漬冷却において常電導伝播後のクエンチ検出には有効電力法が有効であることを明らかにしてきた<sup>7)</sup>。

本年度は、冷凍機冷却条件における急熱急冷Nb<sub>3</sub>Al線の熱的挙動から、MQEおよびNZPVに影響を及ぼす支配的因子を実験的に明らかにするとともに、冷凍機冷却コイルにおけるクエンチ検出に有効電力法を用いるを試みる。

Table 1 Specifications of Nb<sub>3</sub>Al sample wires

線材名	F1	F2	F3
Matrix	Nb	Ta	Ta
Outer diameter(mm)	1	1	1
Number of Nb <sub>3</sub> Al filament	144	66 × 54	222
Nb <sub>3</sub> Al filament diameter(μm)	50	7.57	38
Cu/non-Cu ratio	1	0.844	1
Filament barrier	Nb	Nb	Ta
Volume fraction of Cu stabilizer	50%	45.8%	50%

### 2. Nb<sub>3</sub>Al 超電導線試料

今まで測定した3種類のNb<sub>3</sub>Al線の諸元および断面写真をTable 1およびFig. 1に示す。試料F1はNbマトリックス、試料F2とF3はTaマトリックスである。銅安定

化材の体積比は、すべてほぼ 50%であるが、F2 のみ少し低く 45.8%である。

### 3. 実験方法

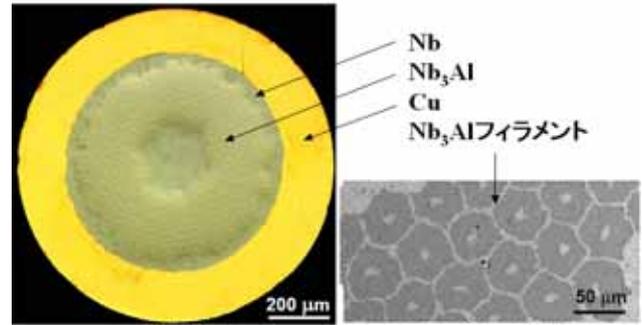
試料線材を直径 36 mm の FRP 製ボビンに巻きつけ、円筒上部を GM 冷凍機の第 2 冷却ステージに接触させ、これを磁場印加用超電導マグネットのボア空間に入れ、所定温度に冷却し磁場を印加した状態で試料線材に電流を流す。この状態で試料に取り付けた熱擾乱投入用ヒータにパルス電流を流して熱擾乱を与える。試料に取り付けた 5 箇所の電圧タップおよび 4 箇所の温度素子(Cernox 抵抗型温度計)からの信号をデジタルオシロスコープに入力し、その時間変化を測定し、発生した常電導部の挙動を観測する。印加した磁場は 10 T から 14 T、設定温度は 7 K から 12 K、通電電流( $I_{op}$ )は臨界電流( $I_c$ )の 80 から 95%(負荷率)とし、各条件における  $MQE$  と  $NZPV$  を求めた。

### 4. 結果と考察

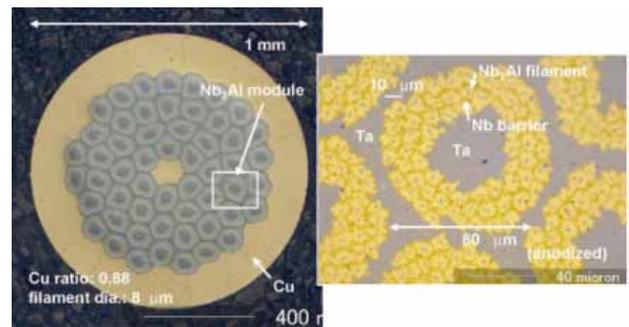
#### 4.1 臨界特性

3 種類の試料線材の臨界電流  $I_c$  を 10 T から 14 T および 7 K から 12 K において測定し、100  $\mu V/m$  基準で求めた。また、 $I_c$  を非銅の断面積で除して臨界電流密度  $J_c$  とした。 $I_c$  および  $J_c$  は、印加磁場および温度の増加とともに減少した。その一例として、3 種類の線材の 14 T における  $I_c$  および  $J_c$  の温度依存性を Fig. 2 および Fig. 3 にそれぞれ示す。いずれも F3 が最も高く、わずかの差で F1 と続き、F2 は F1, F3 に比べて 2/3 から 1/2 ほど低い値となった。

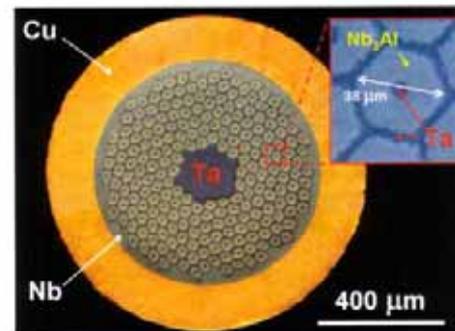
また、各磁場において一定の微小電流を流して温度変化させた状態で抵抗を測定し、超電導 - 常電導転移曲線の midpoint で定義した臨界温度( $T_c$ )の磁場依存性を測定した。これらの中で  $T_c$  に大きな差異はないが、 $J_c$  は異なった結果が得られた。この原因は、急熱急冷およびその後の熱処理条件の微妙な違いが、 $Nb_3Al$  自身の  $J_c$  に寄与したことも考えられるが、マトリックス材の構成比の違いによって、見かけ上差異が生じたとも考えられる。



(a)F1



(b)F2



(c)F3

Fig. 1 Cross-sectional view of the  $Nb_3Al$  sample wires

#### 4.2 MQE 特性

$MQE$  が最も高く、かつ  $MQE$  特性の特徴が顕著に現れている F2 について説明する。Fig. 4 に、8 K における 10 T から 14 T までの F2 の  $MQE$  の電流負荷率依存性を示す。いずれも負荷率の増加とともに  $MQE$  が減少しており、さらに磁場の増加とともに  $MQE$  が減少している。これは、 $MQE$  が温度マージンで決定されるという冷凍機冷却特有の現象で  $Nb_3Sn$  線でも観測されている<sup>4-6)</sup>。F1 および F3 サンプル、さらに 7 K から 11 K でも同様の結果が得られている。

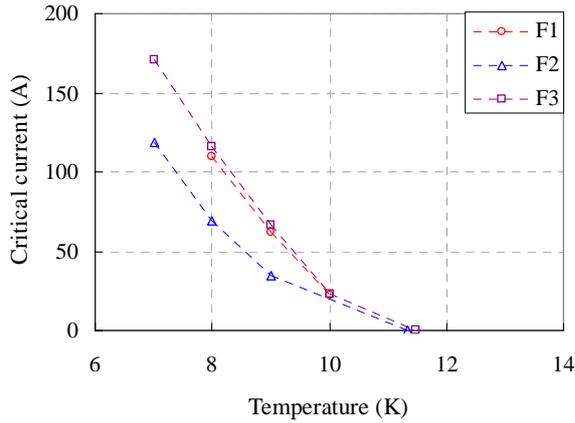


Fig. 2  $I_c$  vs. temperature curves at 14 T for F1, F2 and F3

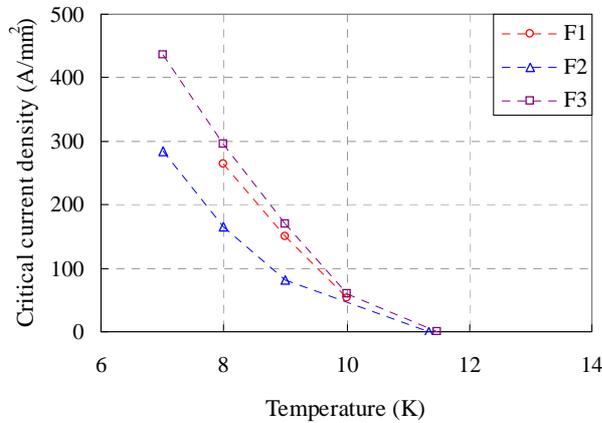


Fig. 3  $J_c$  vs. temperature curves at 14 T for F1, F2 and F3

Fig. 5 に 10 T における 8 K から 11 K までの F2 の  $MQE$  の負荷率依存性を示す．温度の増加とともに

$MQE$  が減少している．これも磁場変化と同様に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．Fig. 6 に，14 T, 9 K における 3 種類の線材の負荷率依存性を示す．いずれも負荷率の増加とともに  $MQE$  が減少しているが，F2 に比べて F1, F3 は小さい．3.1 節で示したように，F2 の  $J_c$  は F1, F3 に比べて小さい．すなわち， $MQE$  と  $J_c$  は負の相関があると考えられる．式(1)に  $MQE$  の理論式を示す．

$$MQE = \frac{CA\sqrt{(T_c - T_{op})^{3/2}}}{(J_c^2)^{1/2}} \times \frac{1-i}{i^{1/2}} \quad (1)$$

ここで， $C$  は体積熱容量， $A$  は断面積， $\rho$  は熱伝導率， $T_{op}$  は線材温度， $r$  は抵抗率， $i$  は負荷率を表わす． $MQE$  は  $J_c$  と逆比例の関係にあり，実験結果と一致していることがわかる．

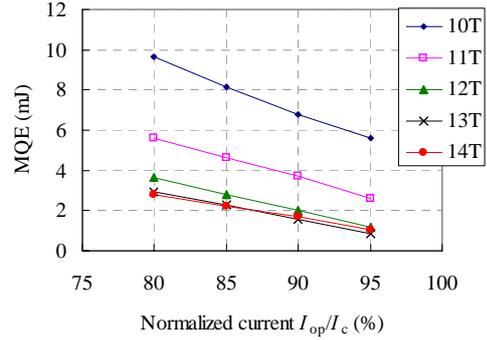


Fig. 4  $MQE$  vs. normalized current at 8 K for various fields in F2

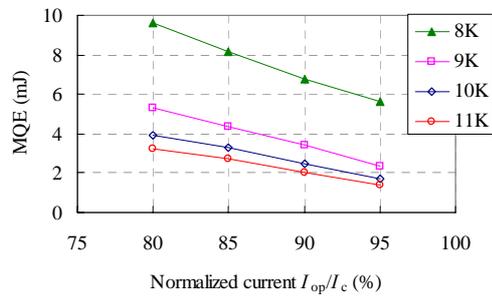


Fig. 5  $MQE$  vs. normalized current at 10 T for various temperatures in F2

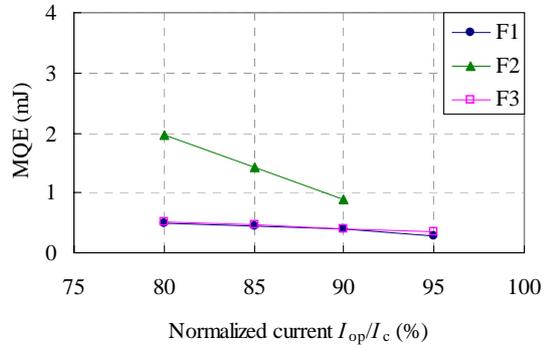


Fig. 6  $MQE$  vs. normalized current at 14 T and 9 K in F1, F2 and F3

#### 4.3 NZPV 特性

磁場変化のデータ数が最も揃っている実験例の一つとして，F3 の 9 K における 11 T から 14 T までの NZPV の通電電流密度( $J_{op}$ )依存性を Fig. 7 に示す．磁場の増加とともに  $J_c$  が低下するため  $J_{op}$  も低下するが，それに伴って NZPV も低下した．次に，温度変化のデータ数が最も揃っている例の一つとして，F3 の 14 T における 7 K から 10 K までの NZPV の  $J_{op}$  依存性を Fig. 8 に

示す。温度の増加とともに  $J_c$  が低下するため  $J_{op}$  も低下するが、それにしたがって  $NZPV$  も低下した。すなわち、高温・高磁場ほど  $NZPV$  が低下する、言い換えると  $NZPV$  は  $J_{op}$  にほぼ比例する結果が得られた。 $NZPV$  の断熱条件下における理論式を式(2)に示す<sup>7)</sup>。

$$NZPV = \frac{J_{op}}{c} \left( \frac{1}{T_c - T_{op}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

この式は、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。磁場および温度が変化すると、熱伝導率  $\kappa$ , 抵抗率  $\rho$ , 熱容量が変化するが、分子の  $\rho\kappa$  は、Wiedmann-Frantz 則よりほぼ一定になる。熱容量の温度・磁場変化の詳細なデータは不明であるが、その変化は小さく  $NZPV$  に及ぼす因子としては  $J_{op}$  が支配的であると思われる。

3種類の  $Nb_3Al$  線材の 12 T における 8 K から 11 K までの  $NZPV$  の  $J_{op}$  依存性を Fig. 9 に示す。同じ  $J_{op}$  において  $NZPV$  は、同じ温度での比較は難しいが、F3 が最も大きく、F1, F2 はほぼ同程度で低い結果が得られた。Table 1 の線材諸元からわかるように、マトリックス材およびフィラメント・バリアの Ta, Nb の組み合わせが線材によって異なっている。Ta は体積比熱が Nb に比べて小さく、式(2)より Ta 量が多いと  $NZPV$  が大きいことが示唆される。F3 はマトリックス/バリア共に Ta で、F1 のすべて Nb の組み合わせ、F2 のマトリックスは Ta, バリアは Nb の組み合わせより、Ta 量が多く、 $NZPV$  が増加したと考えられる。

## 5. まとめ

銅安定化急冷法  $Nb_3Al$  線の  $MQE$  は、線材の  $J_c$  と負の相関がある、 $NZPV$  は  $J_{op}$  に正の相関があるが、第 2 の支配因子として線材を構成する材料の比熱が関与することを明らかにした。

## 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.

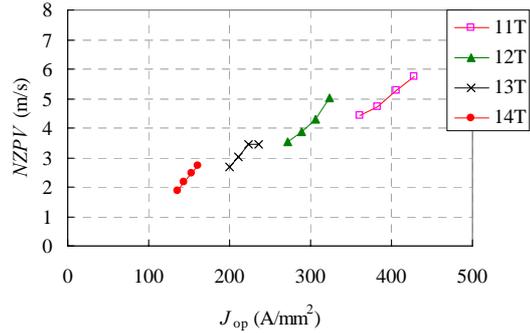


Fig. 7  $NZPV$  vs. transport current density of F3 at 9 K in various fields

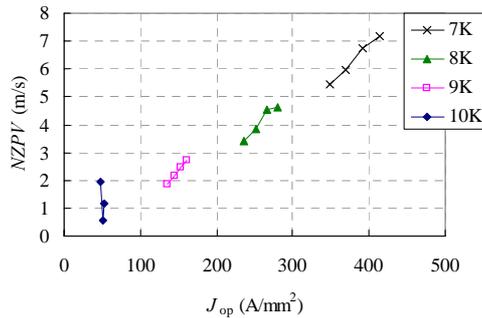


Fig. 8  $NZPV$  vs. transport current density of F3 at 14 T in various temperatures

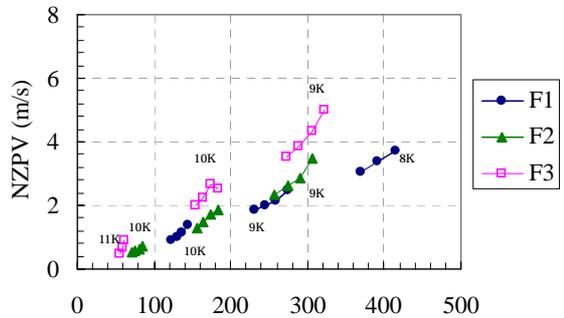


Fig. 9  $NZPV$  vs. transport current density characteristics of F1, F2 and F3 at 12 T in various temperatures

- 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) M. N. Wilson, "Superconducting Magnet"(1983).