

# 共晶ハイエントロピー合金NbScTiZrの磁束ピン止め特性

## Flux Pinning Properties in Eutectic High-Entropy Alloy NbScTiZr

九産大<sup>1</sup>・福工大<sup>2</sup>・大阪公大<sup>3</sup>・東北大<sup>4</sup>

○(B)上田遥翔<sup>1</sup>・西寺照和<sup>1</sup>・上田高佑<sup>1</sup>・川崎佑太<sup>1</sup>・末吉哲郎<sup>1</sup>・

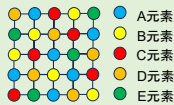
関武留<sup>2</sup>・北川二郎<sup>2</sup>・加藤勝<sup>3</sup>・野島勉<sup>4</sup>・淡路智<sup>4</sup>・佐々木孝彦<sup>4</sup>



### 1. 研究背景

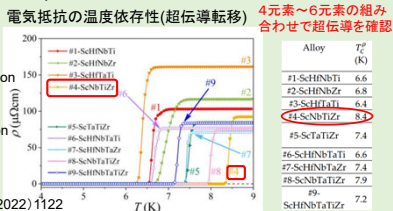
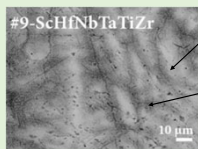
#### ●ハイエントロピー合金 (High Entropy Alloys: HEA)

- 5種類以上の元素から構成される、ほぼ等原子量の合金
- 種々の合金元素が結晶格子にランダムに配置
- 特徴: ミクロ組織に由来して加工硬化性が高い
- 低温で強度が上昇し、延性も増大  
⇒ 超伝導の応用にとって有利



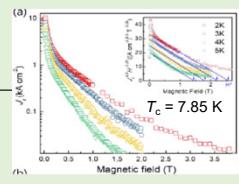
#### ●共晶HEA (ScHfNbTaTiZr) の超伝導を報告 (Krnal et al., 2022) HfNbTaTiZr (最初の超伝導HEA) へのSc添加効果

SEM反射電子像



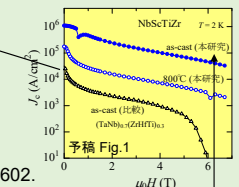
#### ●溶解法で作製したHEA (as-cast試料)

- 臨界電流密度はJ<sub>c</sub>~10<sup>4</sup>A/cm<sup>2</sup>程度、または、それ以下。
  - Ta<sub>16</sub>Nb<sub>26</sub>Hf<sub>16</sub>Zr<sub>16</sub>Ti<sub>16</sub>: J<sub>c</sub>~10<sup>4</sup>A/cm<sup>2</sup> (2K) ← G. Kim et al. Acta Materialia 186 (2020) 250.
  - Hf<sub>21</sub>Nb<sub>25</sub>Ti<sub>15</sub>V<sub>15</sub>Zr<sub>24</sub>: J<sub>c</sub>~4×10<sup>4</sup>A/cm<sup>2</sup> (4K) ← 西寺他, 日本物理学会2021春, 2023春
  - (TaNb)<sub>0.7</sub>(ZrHfTi)<sub>0.3</sub>: J<sub>c</sub>~2×10<sup>4</sup>A/cm<sup>2</sup> (4K) ← 川崎他, 応用物理学会2023春
  - HfMoNbTiZr: J<sub>c</sub>~10<sup>3</sup>A/cm<sup>2</sup> (2K) ← 西寺, 北川他, unpublished



#### ●HEAの高J<sub>c</sub>化の手法

- 熱処理: (TaNb)<sub>0.7</sub>(ZrHfTi)<sub>0.3</sub> 川崎他, 応用物理学会2023春  
(TaNb)<sub>0.7</sub>(ZrHfTi)<sub>0.5</sub> L. Guo, et al. APL 120 (2022) 092602.
- 薄膜化: Ta<sub>16</sub>Nb<sub>26</sub>Hf<sub>16</sub>Zr<sub>16</sub>Ti<sub>16</sub> S-G. Jung et al., Nature Commun. 13 (2022) 3373.
- 高圧ねじり加工: Hf<sub>21</sub>Nb<sub>25</sub>Ti<sub>15</sub>V<sub>15</sub>Zr<sub>24</sub> 西寺他, 日本物理学会2023春
- 共晶化: J<sub>c</sub>の報告なし→本研究



### 2. 研究目的

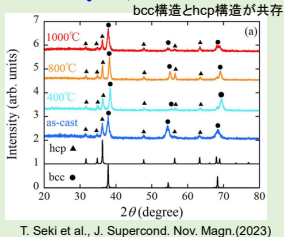
- NbScTiZrの臨界温度T<sub>c</sub>, 上部臨界磁場H<sub>c2</sub>, 臨界電流密度J<sub>c</sub>などの超伝導特性を調べる。
- 熱処理効果を明らかにする。
- J<sub>c</sub>の特性と共晶の組織構造との関係を調べ、磁束ピン止め特性を議論する。

### 3. 実験方法

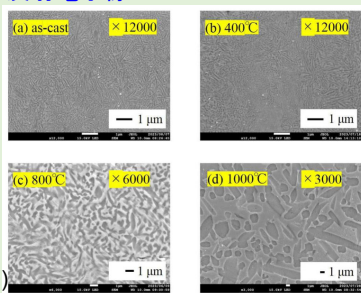
- NbScTiZr試料の作製
- 磁化測定
- 構造解析, 組織観察, 組成分析
- アーク溶解法
- SQUID磁束計 (MPMS3)
- 粉末X線回折
- 高精度ワイヤー切断機, ダイヤモンドカッターで切断
- FE-SEM (JSM-7100F)
- EDX分析

### 4. 実験結果および考察

#### XRDパターン



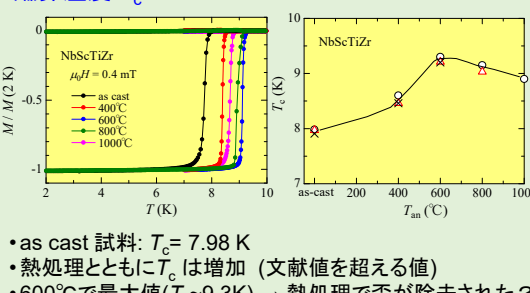
#### 反射電子像



#### EDX組成分析

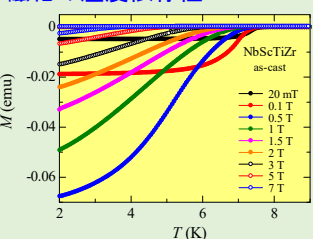
- as-cast(0°C)
  - 明相: bcc相 (57 vol.%) Nb<sub>26.6</sub>Sc<sub>22.3</sub>Ti<sub>25.5</sub>Zr<sub>25.6</sub>
  - 暗相: hcp相 (43 vol.%) Nb<sub>21.3</sub>Sc<sub>30.1</sub>Ti<sub>23.0</sub>Zr<sub>25.8</sub>
- 800°C熱処理試料
  - 明相: bcc相 (50 vol.%) Nb<sub>33</sub>Sc<sub>15</sub>Ti<sub>32</sub>Zr<sub>20</sub>
  - 暗相: hcp相 (50 vol.%) Nb<sub>13</sub>Sc<sub>39.1</sub>Ti<sub>15.1</sub>Zr<sub>32.6</sub>
- 微細構造は各相のサイズを反映

#### 臨界温度 T<sub>c</sub>

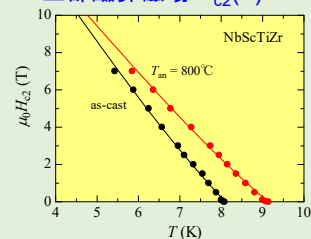


- as-cast 試料でラメラ構造 (~70nm)
- 微細組織構造は熱処理により粗大化

#### 磁化の温度依存性



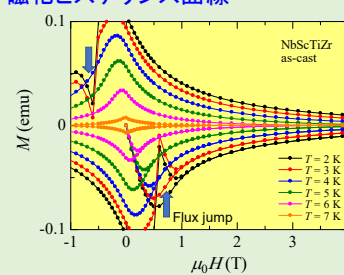
#### 上部臨界磁場 H<sub>c2</sub>(T)



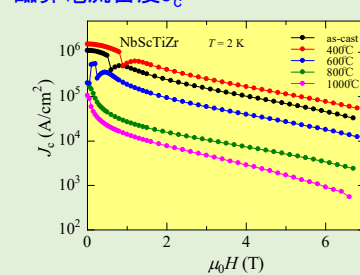
H<sub>c2</sub>から求めたコヒーレンス長ξは as-cast試料の微細組織構造サイズに近い(1/10程度)

T <sub>an</sub> (°C)	μ <sub>0</sub> H <sub>c2</sub> (0)	ξ(0)
0 (as-cast)	19.2 T	4.14 nm
800	17.5 T	4.34 nm

#### 磁化ヒステリシス曲線



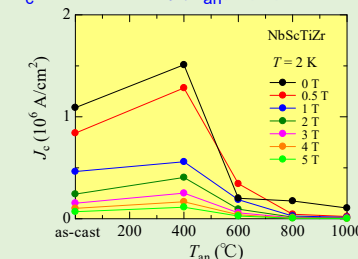
#### 臨界電流密度 J<sub>c</sub>



#### 磁束ピン止めと微細組織構造の関係

- bcc: 超伝導, hcp: 非超伝導
- ラメラ構造により微細化した非超伝導相が分散  
→ as-cast試料で効果的な磁束ピン止め (NbScTiZrの特徴)
- 400°C熱処理でもラメラ構造が保たれているため高J<sub>c</sub>
- 高温熱処理によるJ<sub>c</sub>の低下 ⇔ 非超伝導相が10倍以上粗大化 (>> ξ)

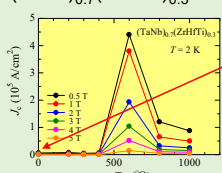
#### J<sub>c</sub>の熱処理温度 T<sub>an</sub> 依存性



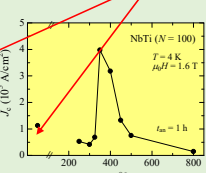
- as-cast 試料
  - J<sub>c</sub>が10<sup>6</sup>A/cm<sup>2</sup>を超え、これまでに報告されたHEAのas-cast試料の中で最も大きい値
  - 作製直後の試料に有効な磁束ピン止め中心が含まれている
  - ピン止め中心の候補: ラメラ構造(非超伝導)
- T<sub>an</sub>=400°C 熱処理試料
  - as-cast 試料よりもJ<sub>c</sub>が増加
  - 比較的低い熱処理温度で最適条件
  - 400°C以下の広い熱処理温度で高J<sub>c</sub>
  - 今後、最適条件を求める必要がある

#### 他のHEA, 2元合金との比較

##### (TaNb)<sub>0.7</sub>(ZrHfTi)<sub>0.3</sub>



##### NbTi



- 熱処理後もbcc相を保ち、異相
- α-Ti相の析出によるピン止めの析出はない
- 元素分布の偏りがピン止め中心の候補 川崎他, 応用物理学会2023春

- 高温 (T<sub>an</sub> ≥ 600°C) 熱処理試料
  - as-cast試料に比べてJ<sub>c</sub>が急激に減少
  - 熱処理によって、磁束ピン止めも弱くなった (組織構造と相関)

### 5. まとめ

- as-cast試料ではJ<sub>c</sub>が10<sup>6</sup>A/cm<sup>2</sup>を超え、これまでに報告されたHEA (as-cast) の中で最も大きい値となった。
- 400°C熱処理試料でJ<sub>c</sub>が更に増加し、比較的低い熱処理温度で高J<sub>c</sub>が得られた。
- ラメラ状の微細組織構造 (hcp相) がピン止め中心の候補と考えられる。
- 高温 (T<sub>an</sub> ≥ 600°C) 熱処理ではJ<sub>c</sub>は減少した。この結果は組織構造の粗大化で説明できる。
- as-cast試料の高J<sub>c</sub>特性は他のHEAやNbTiでは見られない特徴である。