

# 人工ナノ粒子導入Y系超伝導線材を用いた縦磁界利用大容量DCケーブルの開発

キーワード：縦磁界利用大容量DCケーブル、Y系超伝導線材、磁束ピンニング点

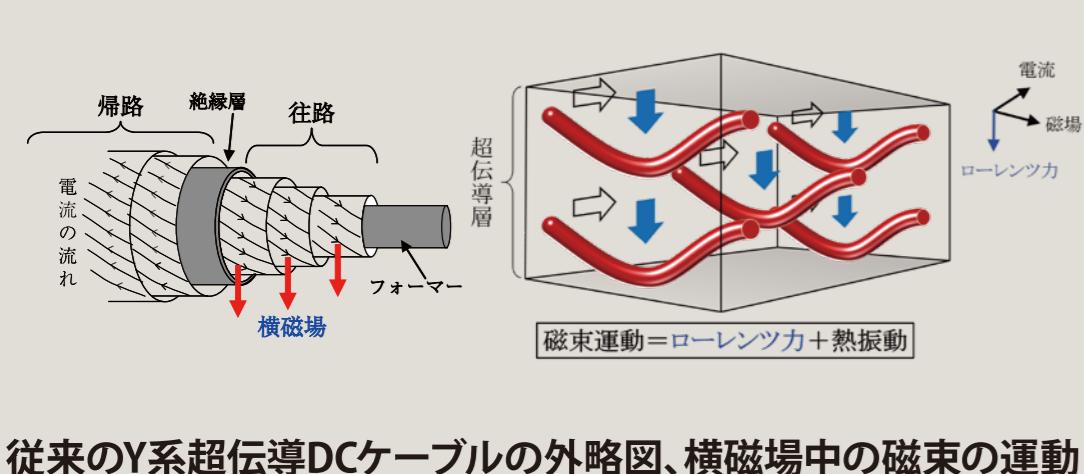
【代表者】 三浦 正志 教授(成蹊大学)

【共同研究者】 木内 勝 准教授(九州工業大学)、淡路 智 教授(東北大学)

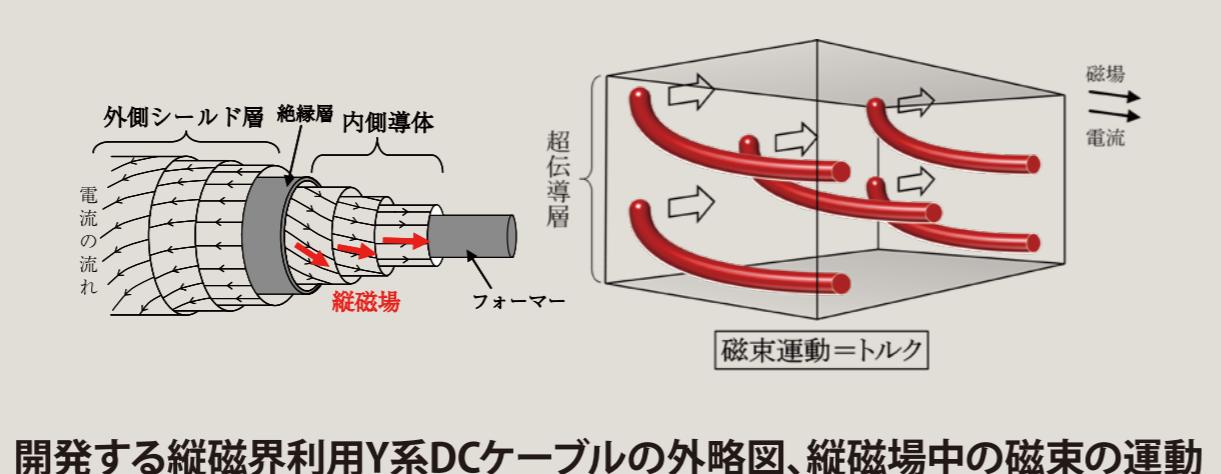
(所属・職位は採択当時のもの)

## 背景

- 液体窒素温度で超伝導状態となる $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (Y系)線材は高い臨界電流を示し、将来の再生可能エネルギー利用を目的として直流超伝導ケーブルによる送電が求められている。
- 従来の高温超伝導DCケーブルは、超伝導線材内に侵入したナノサイズの量子化磁束がローレンツ力により動くことで臨界電流が低下。
- 縦磁界利用Y系超伝導DCケーブルはローレンツ力の低減により従来ケーブルより電流容量を増加させる特徴を持つため、送電の大容量化またはコンパクトなDCケーブルの作製が可能。



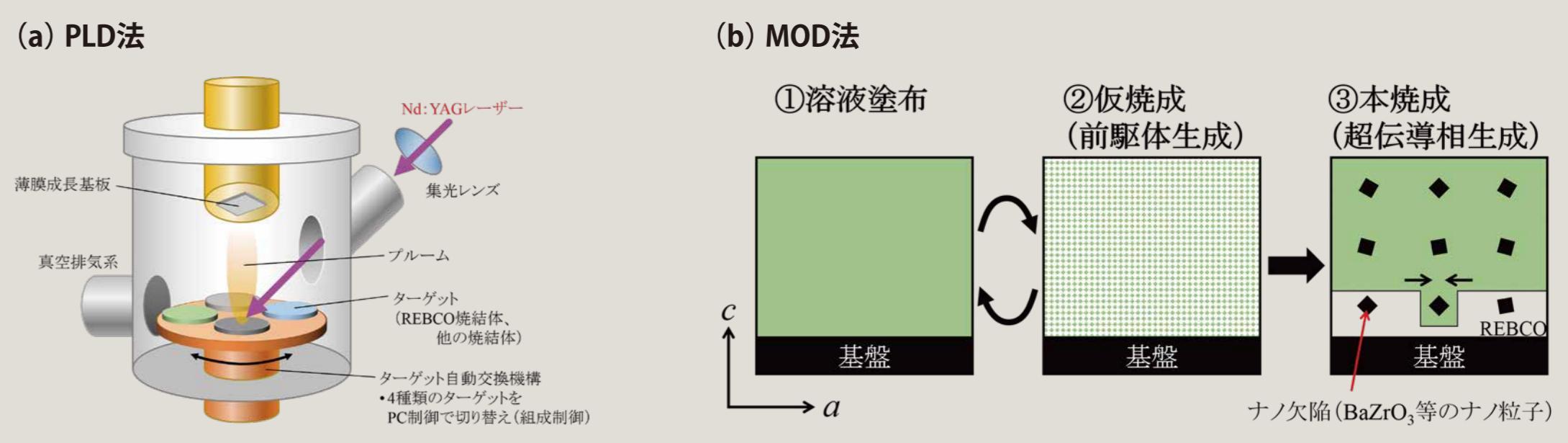
従来のY系超伝導DCケーブルの外略図、横磁場中の磁束の運動



開発する縦磁界利用Y系DCケーブルの外略図、縦磁場中の磁束の運動

## 目的

- Y系超伝導線材作製法として有望なパルスレーザー蒸着(PLD)法及び溶液塗布(MOD)法を用い、更なる縦磁界中臨界電流向上を目的にナノ粒子導入Y系超伝導線材を開発する。
- 縦磁界利用DCケーブル設計・試作を行い、革新的縦磁界利用Y系超伝導DCケーブルの実用化に展開するための基盤研究を確立する。



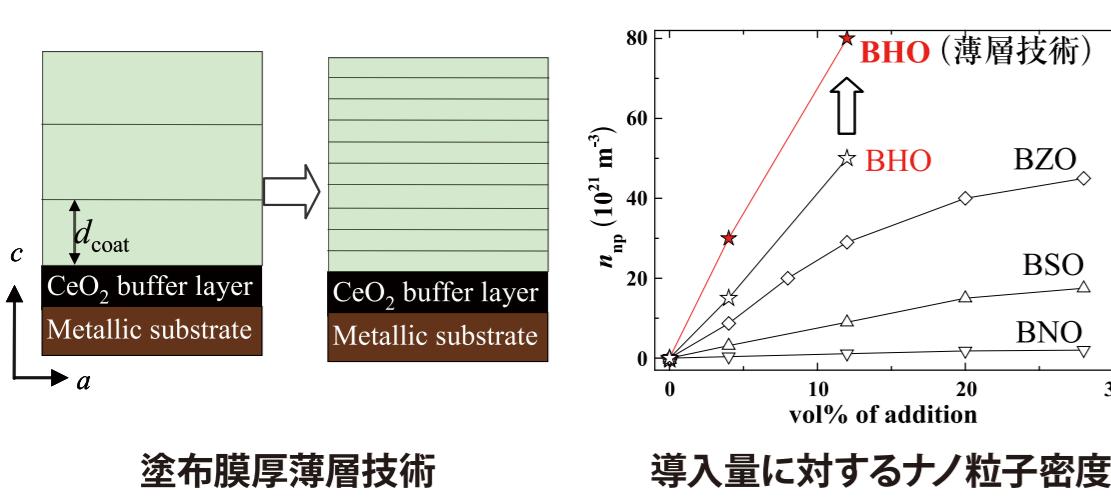
PLD法、MOD法によるY系超伝導線材作製の概略図

## 研究項目1：縦磁界中高臨界電流を有する人工ナノ粒子導入Y系線材の開発

【担当者】三浦正志(成蹊大学)・淡路智(東北大学)

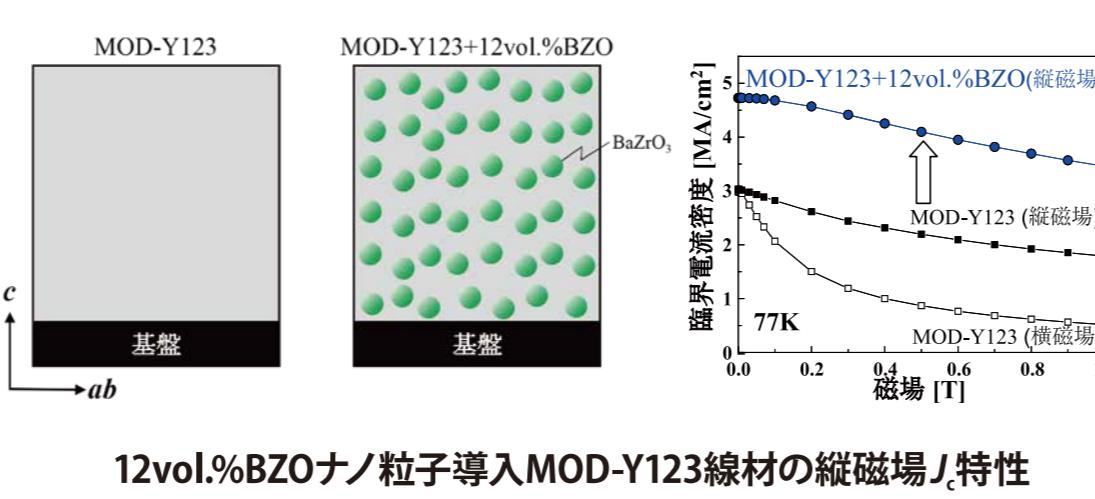
### 細目1 MOD-Y123線材に導入する BaMO<sub>x</sub>ナノ粒子のサイズ・密度制御

MOD法を用いてナノ粒子の密度・サイズを制御することにより、12vol.%BaHfO<sub>x</sub>導入MOD-Y123線材で世界最高レベルの横磁場J<sub>c</sub>特性を得ることに成功。



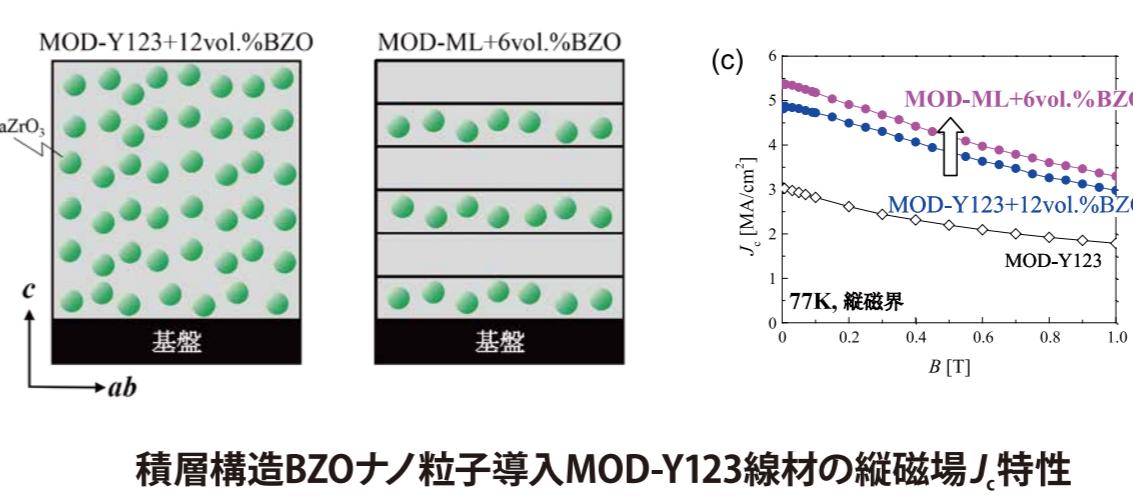
### 細目2 BaMO<sub>x</sub>ナノ粒子導入MOD-Y123線材の縦磁場J<sub>c</sub>特性

BaZrO<sub>x</sub>ナノ粒子を導入したMOD-Y123+BZO線材は磁束トルクを抑制し、MOD-Y123線材に比べて高い縦磁場J<sub>c</sub>特性を示す。

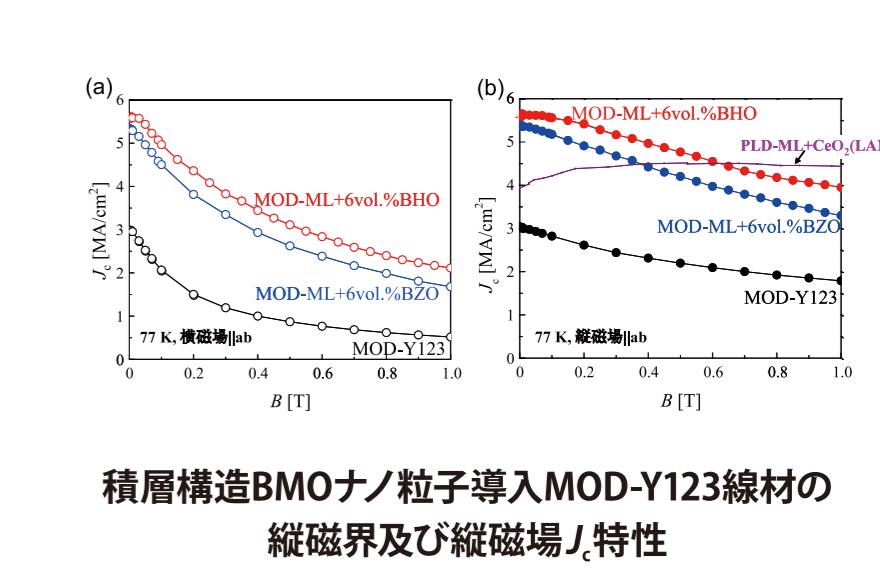


### 細目3 積層構造BaMO<sub>x</sub>ナノ粒子導入MOD-Y123線材の縦磁場J<sub>c</sub>特性

(a) 積層構造BaZrO<sub>x</sub>ナノ粒子導入MOD-Y123線材  
BaZrO<sub>x</sub>ナノ粒子を有する層とナノ粒子無し層を交互に重ねた積層構造により、積層構造を持たない線材や従来のY系線材に比べて高い縦磁場J<sub>c</sub>特性を示す。

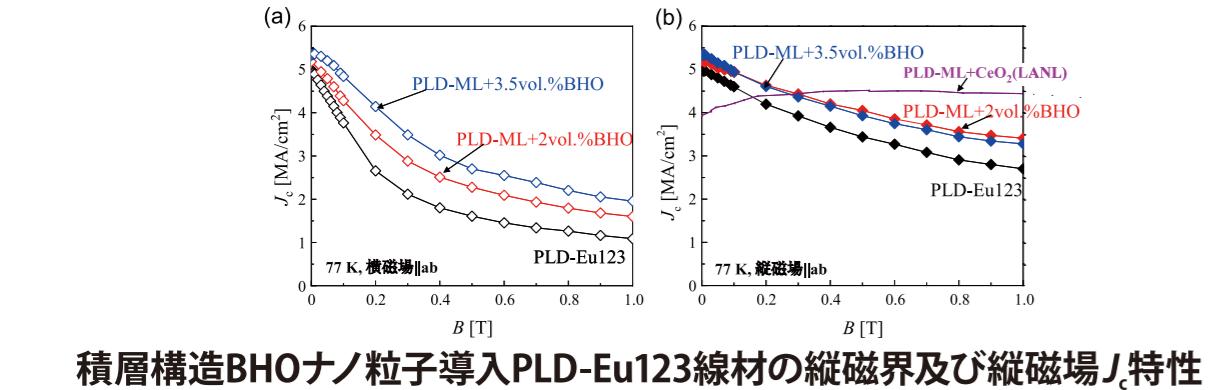


(b) 積層構造BaHfO<sub>x</sub>ナノ粒子導入MOD-Y123線材  
12vol.%BaHfO<sub>x</sub>導入層とナノ粒子無し層を交互に重ねた積層構造を有するMOD-ML+6vol.%BHO線材では、これまでもっとも高い縦磁場中特性を示すとされたMOD-ML+CeO<sub>x</sub>線材に比べて0.6Tまで高い特性を示す。



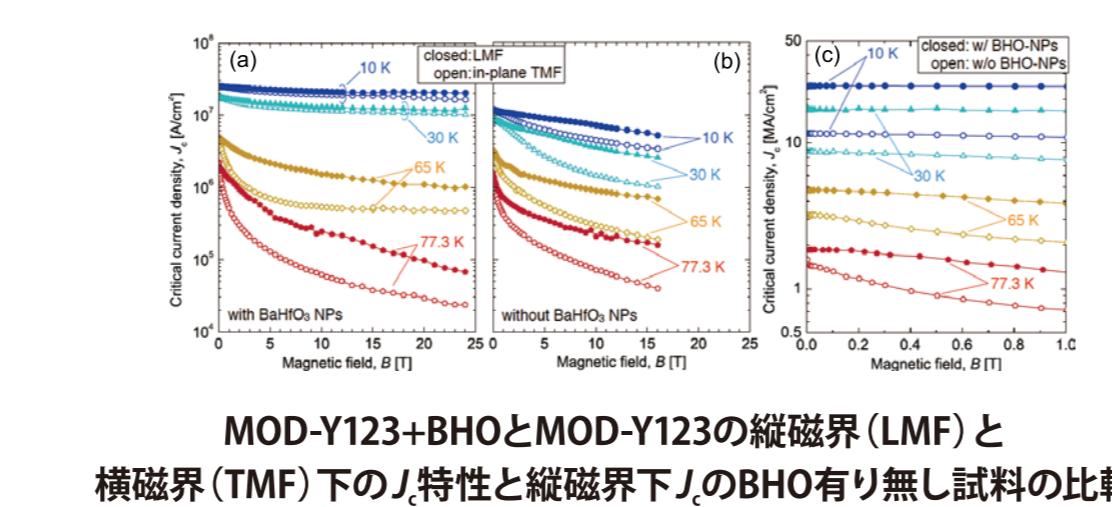
### 細目4 積層構造BaMO<sub>x</sub>ナノ粒子導入PLD-Y123線材の縦磁場J<sub>c</sub>特性

積層構造ナノ粒子導入技術をPLD法Y123線材作製に応用。いずれの線材も縦磁場において高い特性を示す。特に積層構造を有するPLD-ML+2vol.%BHO線材は、PLD-ML+CeO<sub>x</sub>線材に比べても0.3Tまで高い特性を示し、MOD法、PLD法共に積層構造とナノ粒子導入により、縦磁場J<sub>c</sub>特性が飛躍的に向上することを確認。

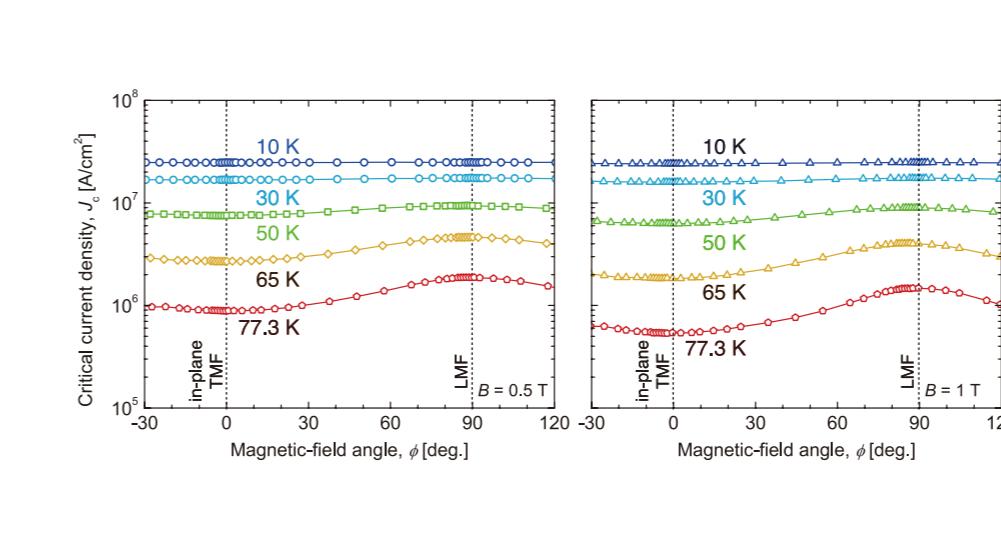


### 細目5 低温高磁場における縦磁場J<sub>c</sub>特性に及ぼすナノ粒子の影響の解明

縦磁界によるJ<sub>c</sub>の向上は低温ほどその効果が小さくなるが、ナノ粒子導入によってすべての温度・磁場領域で向上し、低温ほどその効果が顕著。

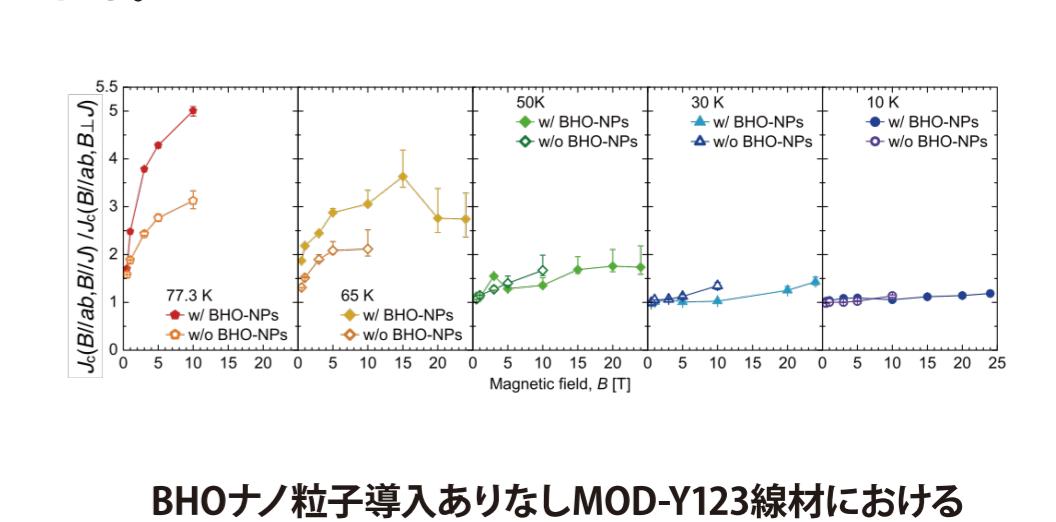


これら試料の縦磁界と横磁界下のJ<sub>c</sub>の比は、ナノ粒子導入により高温では大きく、温度の低下に伴って縦磁界の効果は小さくなる。



MOD-Y123+BHOテープにおける各温度のJ<sub>c</sub>の角度依存性はab面内の電流方向と磁場のなす角度で、0°は横磁界、90°は縦磁界に相当

磁場の角度を横磁界( $\theta = 0^\circ$ )から縦磁界( $\theta = 90^\circ$ )に回転した際のJ<sub>c</sub>の角度依存性は、温度の低下に伴って小さくなり、30K近傍以下ではほぼ平坦となることから、低温で磁束トルクが支配的でなく、横磁界と同様に通常の横方向の磁束ピンニングが支配的となっていると考えられる。

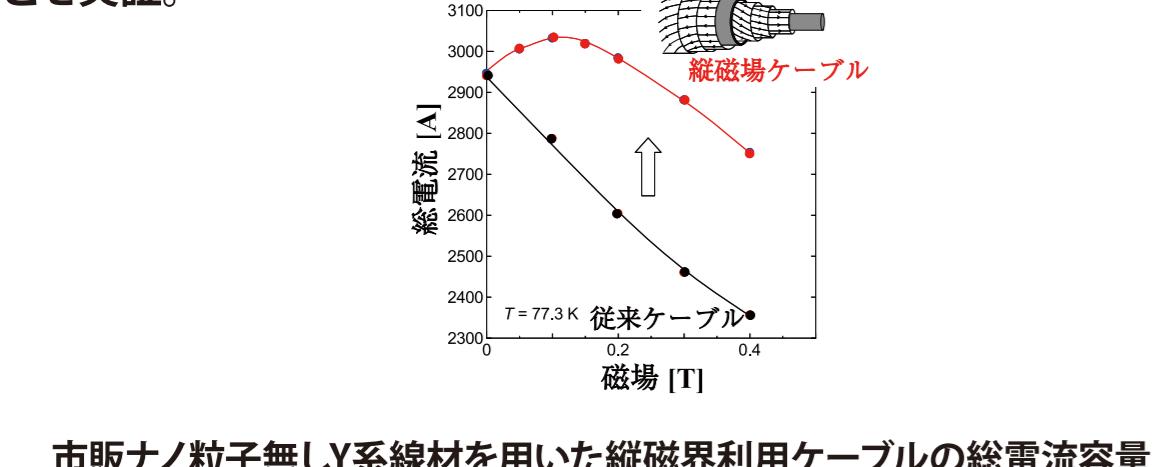


## 研究項目2：ナノ粒子導入Y系線材を用いた縦磁界利用ケーブルの設計・試作・検証

【担当者】木内勝(九州工業大学)

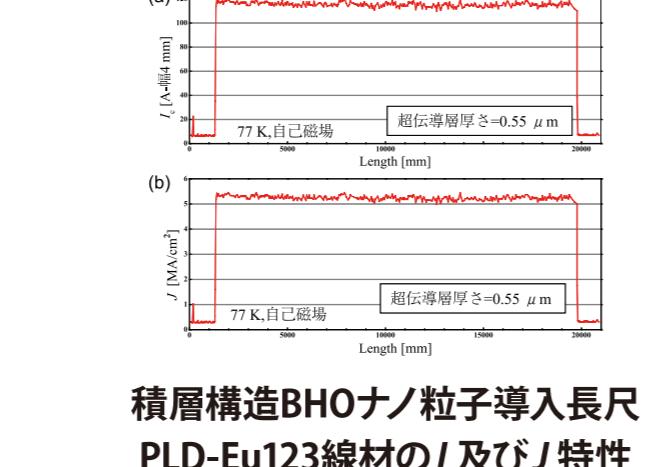
### 細目1 ナノ粒子無し市販Y系線材を用いた縦磁界利用ケーブルの設計・試作

総電流容量に対する縦磁界依存性では縦磁界が0.1T近傍で最大値を示し、1.15倍の総電流(0.2T)を流すことに成功。磁界利用超伝導DCケーブルが從来ケーブルよりも大電流を流すことが可能であり、さらに縦磁界をうまく利用することで総電流容量が増加することを実証。

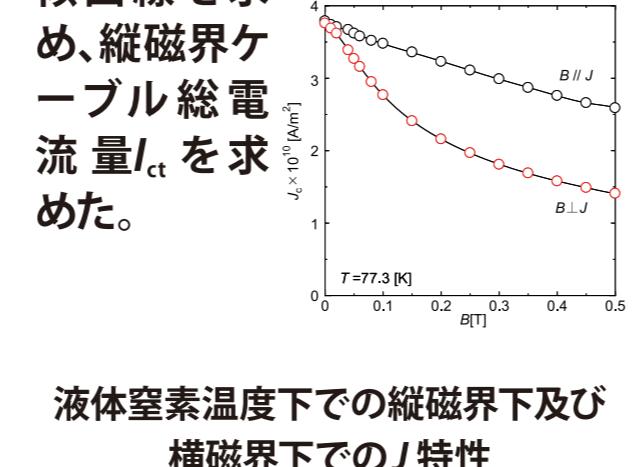


### 細目2 ナノ粒子導入Y系線材を用いた縦磁界利用ケーブルの設計・試作・検証

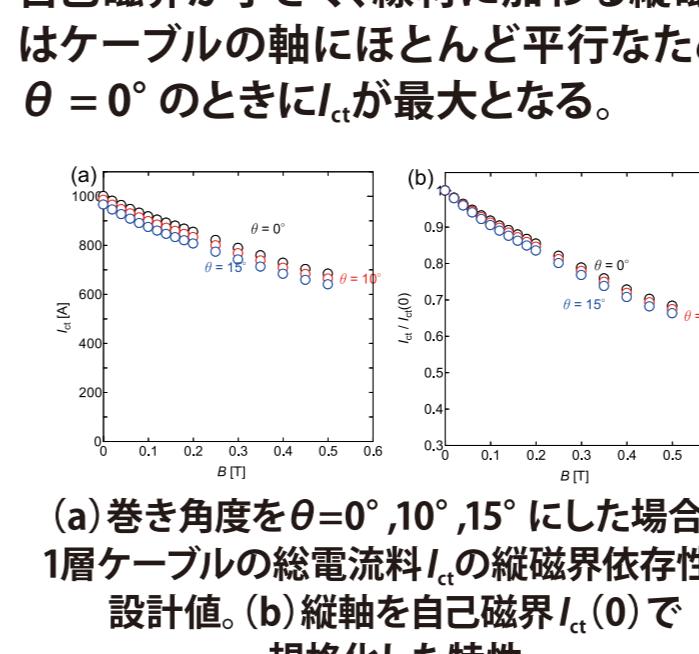
PLD-ML+2vol.%BHO線材の4mm幅、20m長の長尺線材では、20m長にわたり均一かつ高いJ<sub>c</sub>特性を示すことを確認。



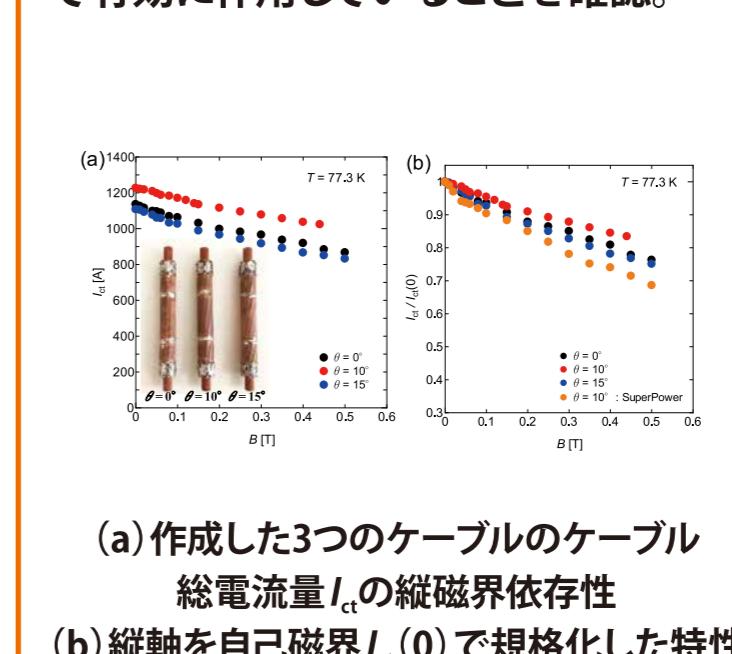
液体窒素温度下でのJ<sub>c</sub>特性では横磁界に比べて縦磁界下で大きなJ<sub>c</sub>が得られ、このJ<sub>c</sub>特性の磁界依存性を考慮するために、J<sub>c</sub>の近似曲線を求め、縦磁界ケーブル総電流I<sub>ct</sub>を求めた。



線材の有効性確認のため、軸に対して3つの巻角度( $\theta = 0^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ )を解析。I<sub>ct</sub>の大きさは $\theta = 0^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ の順となり、磁界と共に減少する傾向を示した。一層ケーブルでは電流通電による自己磁界が小さく、線材に加わる縦磁界はケーブルの軸にほとんど平行なため、 $\theta = 0^\circ$ のときにI<sub>ct</sub>が最大となる。



全長120mmのケーブルを作製し、液体窒素中で縦磁界を加え、通電試験を実施。ケーブル総電流I<sub>ct</sub>及び磁界依存性に関しては $\theta = 10^\circ$ の特性が一番よく、ナノ欠陥が縦磁界ケーブルで有効に作用していることを確認。



巻角度を全ての層で $\theta = 10^\circ$ に固定した多層ケーブルにおいて、ケーブル総電流量I<sub>ct</sub>を解析した結果、1層では縦磁界に対して単調減少しているが、3、5層と層数を増やすと、I<sub>ct</sub>が磁界に対して増加することを確認。

