

Fe11 系超電導薄膜の微細構造

Microstructures of Fe11-type superconducting thin films

一瀬 中, 塚田 一郎, 花輪雅史(電中, JST-TRIP); 秋池 孝則, 今井 良宗, 前田 京剛(東大, JST-TRIP); P. Mele, 松本 要(九工大, JST-TRIP); 吉田 圭, 一野 祐亮, 吉田 隆(名大, JST-TRIP); 木須 隆暢, 向田 昌志(九大, JST-TRIP)
 ICHINOSE Ataru, TSUKADA Ichiro, HANAWA Masafumi (CRIEPI, JST-TRIP); AKIIKE Takanori, IMAI Yoshinori, MAEDA Atsutaka (Univ. of Tokyo, JST-TRIP); MELE Paolo, MATSUMOTO Kaname (KIT, JST-TRIP); YOSHIDA Kei, ICHINO Yusuke, YOSHIDA Yutaka (Nagoya Univ., JST-TRIP); KISS Takanobu, MUKAIDA Masashi (Kyushu Univ., JST-TRIP)
 E-mail: ai@criepi.denken.or.jp

1. はじめに

Fe11 系超電導材料は, Fe 系超電導材料の中で As を含まず, 結晶構造が最も単純であるため, パルスレーザー蒸着法 (PLD 法) により薄膜作製が比較的容易である。Fe11 系超電導材料は T_c の圧力効果が見られ, 4GPa に加圧することによりオンセット温度が 36K まで上昇することが知られている。さらに, FeSe の Se を同族元素の Te で部分置換したり, FeTe の Te を同様に同族の S で部分置換したりすることにより, T_c が変化することが知られている。このように, Fe11 系超電導材料は結晶構造が歪むことで超電導特性が変化すると考えられる。薄膜においては, 基板と超電導材料の格子定数の違いにより, 基板から超電導薄膜への応力印加が可能のため, 基板材料を変えることにより, 超電導薄膜の T_c の変化が期待できる。そこで, 各種単結晶基板上に Fe11 系薄膜を作製したところ, T_c は基板材料により大きく変化し, その変化は薄膜の格子定数に相関していることが分かった。しかし, 薄膜材料の格子定数の変化は, 基板の格子定数と相関が見られなかった。さらに, 全ての薄膜は c 軸配向しているが, 基板によってはほとんど面内配向しておらず, エピタキシャル成長していないことが分かった。基板界面近傍の微細構造分析から, 基板と薄膜との間に数 nm のアモルファス層の有無が確認され, この層が面内配向性に影響を及ぼしている可能性がある。

2. 実験方法

Fe(TeSe)ターゲット材料を用いて, MgO, SrTiO₃, LaAlO₃, YSZ, LaSrAlO₃, LaSrGaO₃ の各種単結晶基板上に, また, Fe(TeS)ターゲット料を用いて, MgO, SrTiO₃ 単結晶基板上に KrF レーザーあるいは2倍波の Nd:YAG レーザーによる PLD 法で薄膜を作製した。詳細な作製方法は参考文献 1,2,3 に示す。作製した薄膜は, 集束イオンビーム装置 (FIB装置) を用いてマイクロサンプリング法により微小試料を切出し, 薄片化し, 微細構造観察試料を得た。断面構造の観察には透過型電子顕微鏡 (JEOL-2100F) を用い, 明視野像の観察, EDX

により組成分析等を実施した。

3. 実験結果および考察

Table I に微細構造観察を行った試料の一覧を示す。全ての薄膜は c 軸配向膜であった。しかし, 面内の配向性は 4 回対称, 8 回対称, ほとんど面内配向性が見られないもの等, 様々であった。さらに, 8 回対称の中でも, MgO の場合には 4 回対称の大きなピークに合わせて, その間に小さなピークがあり, 8 回対称となっていたが, LSAO および LSGO はピーク強度も著しく低下していた。また, エピタキシャル成長していると思われる 4 回対称を示す薄膜においても, 薄膜の c 軸長は基板の格子定数との相関が見られなかった。

FeTeSe 薄膜のターゲット仕込み組成は FeTe_{0.5}Se_{0.5}, FeTeS 薄膜のターゲット仕込み組成は FeTe_{0.8}S_{0.2} である。組成分析の結果, 全ての膜において, Se(S), Te が Fe に対して欠損していることが分かった。また, 欠損量が多い膜では, 特に Te が減少していることが分かった。

このような薄膜の断面 TEM 観察および組成分析を行った結果, 基板の種類により基板と薄膜の界面接合状態が異なることが分かった。さらに, 界面にアモルファスの様な薄い層が存在する場合には, 膜内の酸素量が増加していることが分かった。微細構造観察結果より, アモルファス層の生成, 面内配向性, 組成ずれについて議論する。

謝辞

本研究は JST-TRIP のプロジェクトにおいて行われた。

参考文献

1. Y. Imai, et al.: Appl. Phys. Express 3 (2010) 043102
2. P. Mele, et al.: Supercond. Sci. Technol. 23 (2010) 052001
3. Y. Yoshida, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 82 (2010) p.178

Table I Specifications of Fe11-type thin films

Substrate	Thickness [nm]	In-plane alignment	T_c onset [K]	T_c zero [K]	Te/Se(S)
FeTe_{0.5}Se_{0.5} by KrF PLD					
MgO(100)	55	4 回対称	10.6	9.1	} 代表的な例 0.316/0.426
LAO(100)	50	4 回対称	10.7	9.2	
STO(100)	50	4 回対称	8.2	5.9	
YSZ(100)	50	-	-	-	
MgO(110)	26	4 回対称	6.2	4.8	
LSAO(0001)	80	8 回対称	3.9	<2	
LSGO(0001)	50	8 回対称	3.7	<2	
FeTe_{0.8}S_{0.2} by KrF PLD					
MgO(100)	188	4 回対称	6.5	5.4	0.86/0.12
STO(100)	119	4 回対称	5.5	3.5	0.49/0.13
FeTe_{0.8}S_{0.2} by Nd-YAG PLD					
MgO(100)	50	8 回対称	7.3	~4	0.66/0.14
STO(100)	50	4 回対称	7.6	~4	0.52/0.16

Fe(SeTe)系膜のホモエピタキシャル成長用基板の作製 Growth Fe(SeTe) substrates for homoepitaxial Fe(SeTe) films

向田昌志(九大), 結城健太(マツダ), 一瀬中(電力中央研究所), MELE Paolo(九工大), 松本要(九工大),
一野祐介(名大), 吉田隆(名大), 木須隆暢(九大)

M. Mukaida, K. Yuki, A. Ichinose, P. Mele, K. Matsumoto, Y. Ichino, T. Yoshida, T. Kisu
mukaida@zaiko.kyushu-u.ac.jp

1 緒言

2008年、新たに鉄を含む化合物である $\text{LaFeAsO}_{1-x}\text{F}_x$ (LaFeAsO) が超伝導体であることが発見された。¹⁾ それ以後、鉄系超伝導体に関する数多くの研究が行われている。その中で、毒性の高いヒ素を含まず、また結晶構造が比較的単純な FeSe 超伝導体は将来の薄膜化によるデバイス応用の材料として期待されている。しかしながら、それらの研究の多くは多結晶体に関するものであり、 FeSe 単結晶²⁾ の最適な作製プロセスの検討が急務となっている。そこで、本研究では超伝導特性を示す正方晶 FeSe や、より高い臨界温度 (T_c) を示す正方晶 $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ の単結晶の作製を目標とした。さらに、単結晶の成長過程において単結晶のサイズや形状、結晶構造に影響を与える因子を調査し、それらの制御を目指した。

2 実験

Fe と Se 、 Te を所望の割合で混合し、 425° に 20 時間保持した。その後、得られた粉末を $700\text{MPa}/\text{cm}^2$ で圧粉し、 650° で 72 時間保持して多結晶粉末を作製した。その後、溶媒の KCl や NaCl を混合し、高温において FeSe 及び $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ 単結晶の溶液成長を試みた。また、本研究では保持温度を $1000^\circ \sim 750^\circ$ の間で、冷却速度を $5^\circ/\text{h} \sim 0.1^\circ/\text{h}$ の間で様々に変化させ $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$ 単結晶成長に対する保持温度や冷却速度の与える影響を調査した。

3 結果と考察

保持温度 1000° から $3^\circ/\text{h}$ で 770° まで徐冷することで FeSe や $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ の結晶を得ることができた。しかし、得られた結晶はデンドライト状の結晶形状をしており冷却速度が速いことが示唆された。そこで、同様の保持温度において $1^\circ/\text{h}$ とより遅い冷却速度にすることで形状が改善し、平滑な FeSe 、 $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ 結晶を得た。これにより冷却速度が結晶の形状に影響を与えることが分かった。また、同一の冷却速度であっても、保持温度と終了温度の温度差が大きいほど結晶のサイズが大きくなることが分かった。しかしながら XRD 測定の結果、得られた結晶は六方晶であることが確認された。平衡状態図では FeSe はより低い温度域で正方晶の結晶構造を示すことから、より低い保持温度の 750° 、冷却速度 $1^\circ/\text{h}$ の条件で作製した。その結果、図 1 に示す $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ 単結晶が得られ、XRD 測定から、図 2 に示すように正方晶の 001

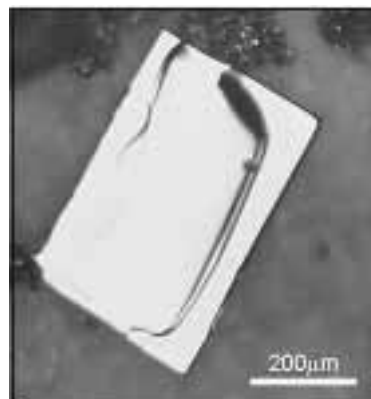


図 1: A grown $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ single crystal.

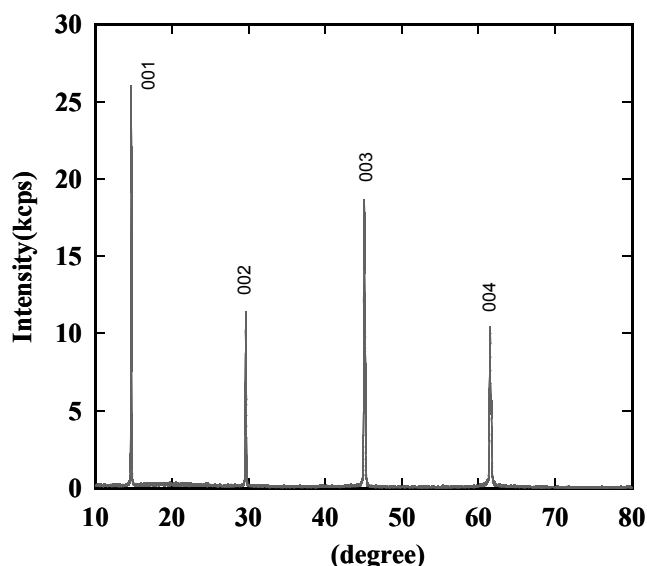


図 2: Typical XRD pattern of a $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ single crystal.

ピークが確認された。以上により、結晶構造は保持温度の違いにより変化すると考えられる。

4 まとめ

KCl や NaCl を用いたフラックス法で、保持温度や冷却速度などの条件を適正化することで形状や結晶構造が制御でき、目標である $500\mu\text{m} \sim 1\text{mm}$ 程度の正方晶 $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ の単結晶が得られる事が分かった。

参考文献

- 1) Y. Kamihara *et al.*, *J. Am. Chem. Soc.* **130**, 3296 (2008).
- 2) M. J. Wang, *et al.*, *cond-mat.supr-con* **arXiv:0904.1858** (2009).

フッ素フリー MOD 膜の新バッファ層の検討

Trials of new buffer layers for FF-MOD films

向田 昌志(九大), 一瀬 中 (電中研)

M. Mukaida, A. Ichinose,
mukaida@zaiko.kyushu-u.ac.jp

1 緒言

第二世代の超電導線材開発が、米国では DOE プロジェクトのもと、ロスアラモス国立研究所¹⁾とオークリッジ国立研究所を中心²⁾に、日本では NEDO プロジェクトのもと、超電導工学研究所を中心³⁾に進められている。超電導膜の作製方法では、低コストが目玉となる MOD 法が現在主流であるが、作製が容易な TFA-MOD 法では、内部から F₂ ガスが出るために、厚膜化していくと表面が荒れるという問題点がある。一方、AIST⁴⁾や住友電工⁵⁾は FF-MOD 法を進めている。今回 CeO₂ でコートされてい金属クラッド基材表面を他の物質でコートすることにより、そのバッファ層が FF-MOD 膜形成に与える影響を調べたので報告する。

2 実験

金属クラッド基材は中間層が蒸着された状態で住友電工様よりご提供頂いた。そのため、表面は、CeO₂ である。この CeO₂ 表面に、レーザー蒸着法で La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃ 膜を 3-15nm ほど蒸着した。基板温度は、700°C と室温の 2 条件を用いた。その上に、成長後の膜厚が 0.6μm となるように、FF-MOD 膜の塗布と仮焼を数回繰り返し、最後に本焼を行って、膜を得た。得られた膜への酸素導入は、500°C 付近での酸素中熱処理により行った。

作製された膜の評価は、表面形状は SEM で、結晶性は X 線回折、超電導特性は 4 端子法で、行った。

3 結果と考察

図 1 に、700°C で成長した La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃ バッファ層上に形成された FF-MOD 膜の表面 SEM 像を示す。表面は、テラス幅 500nm-1μm ほどを持つ、階段状のテラスが観察され、下地から結晶がステップフローを起こして、成長していることが分かる。なお、このステップフローは、下地結晶の微傾斜が原因⁶⁾と思われる。

これまで、我々グループで作製してきた TFA-MOD 膜の表面に比べて、析出物が少なく、非常に綺麗であることから、内部の結晶性が良いことが期待される。

今回得られた FF-MOD 膜の T_C は、88.7 K であった。この膜は 0.5cm 幅で、約 10 A の超電導臨界電流値を持っていた。0.6μm と予想された膜厚は、透過電子顕微鏡観察から、0.45μm ほどと推定されたため、おおよその臨界電流密度は、0.44MA/cm² となる。

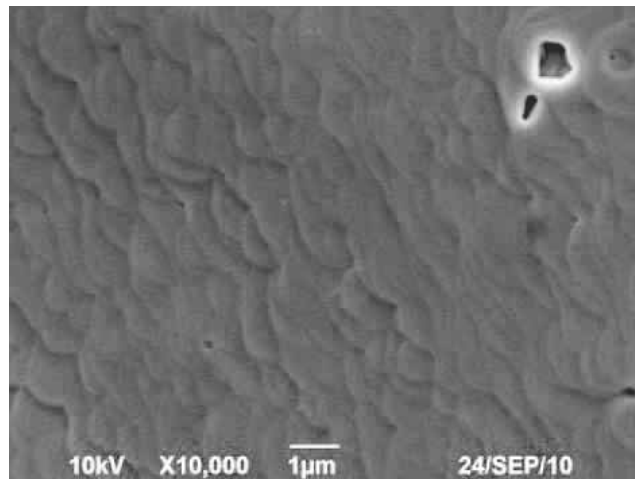


図 1: A typical SEM image of a FF-MOD film on a La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃ buffer layer.

臨界電流密度が低い理由は、粒界での臨界電流密度低下、結晶性が良いためにピン止め点が少ないことと、バッファ層に用いた La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃ が結晶性は良くしたが、超電導膜中にコンタミとして入り、J_C を下げたことが予想される。今後は、結晶性を低下させることなく、粒界や粒内での臨界電流密度低下を引き起こさない中間層の探索が必要である。なお、アモルファス La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃ バッファ層上への FF-MOD 膜の作製では、配向性が得られなかったことを付記する。

4 まとめ

金属クラッド基材上への FF-MOD 膜形成においては、ステップフローを起こして、成長するほど、結晶性の良い超電導膜が作製できることが明らかとなった。

参考文献

- 1) R. A. Hawsey, *et al.*, *Advances in Superconductivity* **12**, 561 (2000).
- 2) J. O. Willis, *et al.*, *Physica C* **335**, 73 (2000).
- 3) Y. Shiohara, N. Hobara, *Advances in Superconductivity* **12**, 567 (2000).
- 4) M. Sohma, *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **15**, 2699 (2005).
- 5) K. Ohmatsu, S. Hahakura, K. Hasegawa, M. Ueyama, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **17**, 3363 (2007).
- 6) M. Mukaida, S. Miyazawa, M. Sasaura, *Jpn. J. Appl. Phys.* **30**, L1474 (1991).

RF-Sputter 法による Re-123 系線材用 CeO_2 中間層の開発 (5)

— 量産検討と IBAD-MgO 基板上の成膜検討の進捗状況 —

Development of CeO_2 buffer layer for coated conductors by RF-Sputtering (5)

中西 達尚, 小泉 勉, 木村 一成, 中村 達徳, 広長 隆介,

青木 裕治, 青木 伸夫, 長谷川 隆代 (昭和電線ケーブルシステム)

飯島 康裕, 齋藤 隆 (フジクラ), 高橋 保夫, 吉積 正晃, 和泉 輝郎 (SRL)

NAKANISHI Tatsuhisa, KOIZUMI Tsutomu, KIMURA Kazunari, NAKAMURA Tatsunori, HIRONAGA Ryusuke,

AOKI Yuji, AOKI Nobuo, HASEGAWA Takayo (SWCC-CS)

IJIMA Yasuhiro, SAITOH Takashi (Fujikura), TAKAHASHI Yasuo, YOSHIZUMI Masaaki, IZUMI Teruo (SRL)

E-mail: t.nakanishi508@cs.swcc.co.jp

1. はじめに

昭和電線では、IBAD-GZO/Hastelloy™ 基板上に CeO_2 中間層を高周波スパッタプロセスにて作製し、NEDO 委託研究である「イットリウム系超電導電力機器開発」において使用する線材を作製している。極低コスト線材の基板として期待され、高速成膜が可能な IBAD-MgO/Hastelloy™ 基板上においてもスパッタプロセスによる CeO_2 中間層の作製が可能であることを確認している。20m での成膜では、全長にわたり $\Delta \phi \text{CeO}_2 = 4 \sim 6^\circ$ 、MOD-YBCO 成膜後の I_c は、200A/cm-w 以上が得られ、IBAD-GZO 基板と同等以上の特性が長尺成膜でも得られている。しかし、IBAD-MgO 上の CeO_2 スパッタ成膜では、 $\text{CeO}_2(111)$ 面の成長した突起が表面平滑性を悪化させる場合があることを前回報告した。今回は、 $\text{CeO}_2(111)$ 面の成長を抑え、 $\text{CeO}_2(200)$ 面が優先配向する成膜条件の検討を行った。

2. 実験方法

CeO_2 中間層は Reel-to-reel (RTR) 式連続成膜機構を持つ RF-Sputter 装置で行った。IBAD-MgO/Hastelloy™ 基板は SRL 殿より供給頂き、IBAD-MgO 層の上に LaMnO_3 をキャップ層として形成した構造の基板を使用した。IBAD-MgO 基板を使った成膜条件検討では、設定温度は 600~800℃、RF 投入電力は ~1kW、導入ガスは Ar- O_2 の混合ガスを用い、 O_2 流量比を変化させた。 CeO_2 中間層の膜厚は 0.5~1 μm である。 CeO_2 膜の結晶性評価は X 線回折 (XRD) 法、表面形状評価は AFM と SEM 観察により行った。

3. 実験結果

LaMnO_3 /IBAD-MgO/Hastelloy™ 上の CeO_2 成膜条件の検討では、今回は酸素濃度について検討を行った。成膜時の酸素濃度を最適化することにより、ほぼ 100% の $\text{CeO}_2(200)$ 配向が得られた。Fig.1 に 100 m の IBAD-MgO 基板上に作

製した CeO_2 中間層の表面形状を示す。試料は 100 m の前端と後端から切り出したものであり、AFM で測定した。

長尺線材の両端の表面状態は、前端と後端でほぼ同じような形態を示し、長尺の長手方向に非常に平滑な表面を持つ CeO_2 中間層が成膜されていることを示唆している。

詳細は、当日報告する。

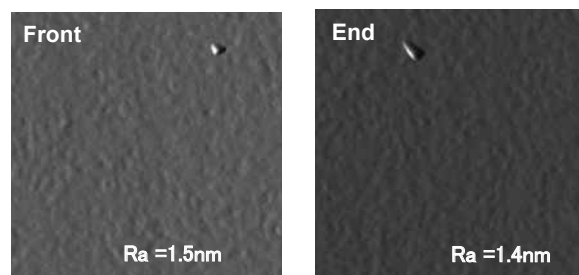


Fig.1 AFM image of CeO_2 surface on the LaMnO_3 /IBAD-MgO/Hastelloy in the area of 5 x 5 μm .

謝辞

本研究は、イットリウム系超電導電力機器技術開発業務の一環として新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託により実施したものである。

参考文献

[1] T.Nakanishi, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol.82 P148 (2010)

人工ピン導入による TFA-MOD 法 YGdBCO 線材の磁場中特性向上

Improvement of magnetic properties for long REBCO coated conductors using TFA-MOD process

木村 一成, 中村 達徳, 広長 隆介, 小泉 勉, 中西 達尚, 青木 裕治, 青木 伸夫, 長谷川 隆代 (昭和電線);
高橋 保夫, 吉積 正晃, 和泉 輝郎, 塩原 融 (超電導工学研究所)

KIMURA Kazunari, NAKAMURA Tatsunori, HIRONAGA Ryusuke, KOIZUMI Tsutomu, NAKANISHI Tatsuhisa,
AOKI Yuji, AOKI Nobuo, HASEGAWA Takayo (SWCC);
TAKAHASHI Yasuo, YOSHIZUMI Masateru, IZUMI Teruo, SHIOHARA Yuh (ISTEC-SRL)
E-mail: k.kimura066@cs.swcc.co.jp

1. はじめに

現在, 昭和電線ではバッチ式プロセスを用いた TFA-MOD 法による YBCO 超電導線材の開発を行っており, 高 I_c 化, 長尺化に向けた研究を行っている。

YBCO 超電導線材は Bi 系超電導線材と比較した場合, 磁場中の特性が優れているため変圧器, モーター, Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) など, 高磁場中での運転が予想される応用機器の線材として期待されている。しかし, 応用機器を開発する側からは更なる磁場中特性の向上と磁場印加角度に対する異方性の低減が求められている。磁場中での特性向上において重要なポイントは, 希土類元素の置換による臨界温度 (T_c) の底上げと人工ピン止め点 (APC) の導入¹⁻²である。PLD 法に代表される気相法では, 希土類元素を Y から Sm や Gd などの元素に 100%置換する手法が取られているが, MOD 法では 100%置換は焼成温度が高温になるために基板の金属元素との反応が無視できなくなり難しい。そこで, 我々は TFA-MOD 法において Gd による Y サイトへの元素の一部置換と Zr 添加による人工ピン止め点の導入を行った。YGdBCO 線材の開発を行い, 線材の基本特性, 磁場中特性の評価および長尺化の検討を行ったので報告する。

2. 実験方法

トリフルオロ酢酸塩 (Y-, Gd-, Ba-), およびナフテン酸塩 (Cu-) を用い, 金属元素の組成比が Y:Gd:Ba:Cu=0.77:0.23:1.5:3.0 になるように原料溶液を調製し, 人工ピン止め点の原料となるナフテン酸 Zr を金属原料に対して 1 wt% 添加した塗布溶液を作製した。この溶液を Hastelloy™ C-276/MgO (IBAD)/LaMnO (PLD)/CeO₂ (Sputtering) の構造をもつ, 幅 5mm の金属基板上に 8.5 m/hour で塗布した後, ドラム型バッチ式電気炉 (昇温レート: 2 °C/min) で仮焼した。塗布・仮焼の工程は 12 回繰り返し, 仮焼テープを作製した。その仮焼テープをバッチ式焼成炉に入れ, 水蒸気を含む減圧低酸素雰囲気中, 最高到達温度 760 °C の条件下で本焼成を行った。YGdBCO 膜の表面に Ag 安定化層を形成し, 酸素雰囲気中においてポストアニールを行った。

線材の特性分布は, 直流四端子法で液体窒素中において評価を行った。なお, 通電法による I_c 値は電圧基準 0.5 μ V/cm で定義した。また, 磁場印加方法として超電導コイルからなるスプリットマグネットを用い, 測定は液体窒素中で行った。

3. 結果

Figure 1 に作製した YGdBCO 線材の I_c 分布を示す。この線材 (超電導層厚 1.1 μ m) は I_c 値が平均で 250 A/cm-w を示し, 全長に渡って, 均一な I_c 分布を有する線材であることがわかる。

次に, 作製した線材から長さ 5 cm の試験片を切り出し, 磁場中の超電導特性について評価した。Figure 2 に 3 T の磁場を印加した時の磁場角度依存性を示す。人工ピンを導入した

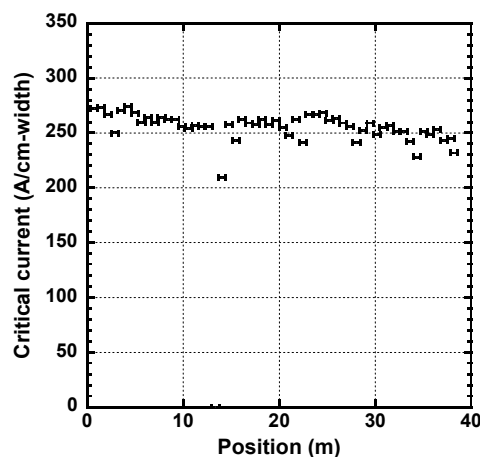


Figure 1 Distribution of critical current (I_c) along the length of 40m YGdBCO+APC coated conductor.

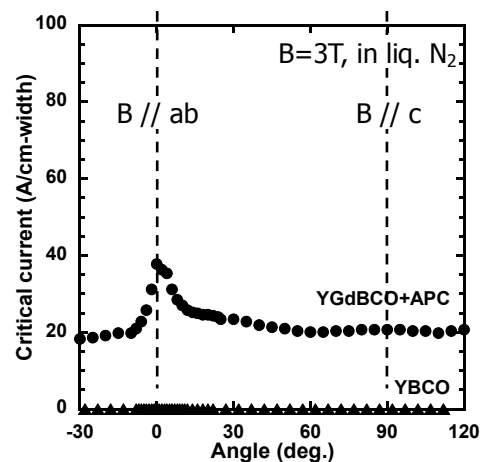


Figure 2 Magnetic field angular dependence of I_c values of YGdBCO+APC coated conductor.

YGdBCO線材は, $B = 3$ Tの垂直磁場が印加された場合でも, 20 A/cm-w以上の I_c 値と緩和された角度依存性を示し, 人工ピン止め点の導入効果が表れていると推察される。また, TFA-MOD法により作製した従来のYBCO超電導線材と比較すると, 磁場中特性が格段に上昇していることがわかる。本研究の詳細は当日報告する。

謝辞

本研究は, 「イットリウム系超電導電力機器技術開発」の一環として, 新エネルギー産業技術総合開発機構 (NEDO) からの委託を受け実施したものである。

参考文献

1. M. Miura, et al.: Applied Physics Express **1** (2008) 051701
2. M. Miura, et al.: Applied Physics Express **2** (2009) 023002

バッファ層に $\text{CeO}_2/\text{Y}_2\text{O}_3/\text{CeO}_2$ を用いた Ni めっき Cu/SUS 複合テープ上への YBCO 超伝導薄膜の作製

Fabrication of YBCO films on the $\text{CeO}_2/\text{Y}_2\text{O}_3/\text{CeO}_2$ buffered Ni-electroplated Cu/SUS316 tapes

魏 一, 土井 俊哉, 勝目 彬人, 宇田 達也, 白樂 善則(鹿児島大);

嶋 邦弘, 窪田 秀一(田中貴金属工業); 鹿島 直二, 長屋 重夫(中部電力)

GI Ichi, DOI Toshiya, KATSUME Akihito, UDA Tatsuya, HAKURAKU Yoshinori (Kagoshima University);

SHIMA Kunihiro, KUBOTA Shuichi (TAMAKA KIKINZOKU K.K.);

KASHIMA Naoji, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power Co.)

E-mail: k8319352@kadai.jp

1. はじめに

これまでに我々は、NiめっきCu/SUS316複合テープ上に $\text{CeO}_2/\text{YSZ}/\text{CeO}_2$ バッファ層を介して270 nm厚のYBCO薄膜を作製することで 3 MA/cm^2 を超える J_c が得られることを報告してきた[1]。今後の厚膜化を想定すると、より酸素拡散係数の小さな材料をバッファ層に採用することが望ましい。そこで今回、YSZより酸素拡散係数が小さい Y_2O_3 をバッファ層に用いて、NiめっきCu/SUS複合テープ上にYBCO薄膜を作製した。

2. 実験および評価方法

NiめっきCu/SUS316複合テープ上に、PLD法を用いて $\text{CeO}_2/\text{Y}_2\text{O}_3/\text{CeO}_2$ 積層膜を形成し、その上にYBCO薄膜を作製した。またYBCO薄膜を作製する際、YBCOの膜厚が270 nmおよび1000 nmである試料を作製した。 CeO_2 薄膜、 Y_2O_3 薄膜、YBCO薄膜の配向性を確認するためにX線回折(XRD)測定および極点図測定を行った。さらに電子線後方散乱回折法(EBSD)を用いてYBCO薄膜の結晶方位を確認した。また、試料表面については走査型電子顕微鏡(SEM)を用いて観察した。試料の臨界電流密度(J_c)、臨界温度(T_c)は直流四端子通電法で測定した。

3. 結果と考察

Fig.1にNiめっきCu/SUS316複合テープ上にYBCOの膜厚を1000nmとして作製したYBCO/ $\text{CeO}_2/\text{Y}_2\text{O}_3/\text{CeO}_2$ 積層膜のXRDパターンを示す。YBCOの(00 l)の回折ピークのみが観察できた。これよりYBCOはc軸配向していることが分かる。

Fig.2にYBCO/ $\text{CeO}_2/\text{Y}_2\text{O}_3/\text{CeO}_2$ 積層膜のYBCOの(103)回折線を用いて測定した極点図を示す。 $\alpha=45^\circ$ の時、 $\beta=0^\circ$ から 90° 毎に4本のピークが観測できた。以上の結果より、作製したYBCO薄膜は2軸配向していることが確認できた。またYBCO薄膜の半値幅は 6.5° と高い配向度を有していることが分かった。Fig.3にYBCO/ $\text{CeO}_2/\text{Y}_2\text{O}_3/\text{CeO}_2$ 積層膜の J_c の磁場依存性を示す。自己磁場中での J_c は 2.1 MA/cm^2 であった。また低磁場領域において J_c の低下がほとんどないことからこのYBCO薄膜は弱結合が存在しない良好な薄膜であると考えられる。YBCO/ $\text{CeO}_2/\text{Y}_2\text{O}_3/\text{CeO}_2$ 積層膜の表面状態、EBSDによる結晶方位の測定結果、抵抗の温度依存性については当日報告する。

4. 参考文献

[1] M. Daio, et al.; TEION KOGAKU (J.Cryo.Soc.Jpn)
vol. 44 No. 11(2009)

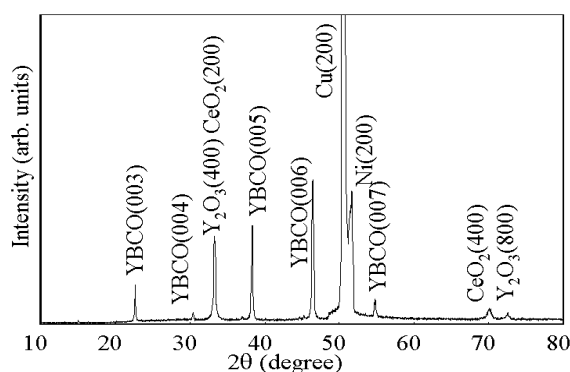


Fig.1 The X-ray diffraction pattern obtained from the YBCO/ $\text{CeO}_2/\text{Y}_2\text{O}_3/\text{CeO}_2/\text{Ni}/\text{Cu}/\text{SUS}$ laminated tape

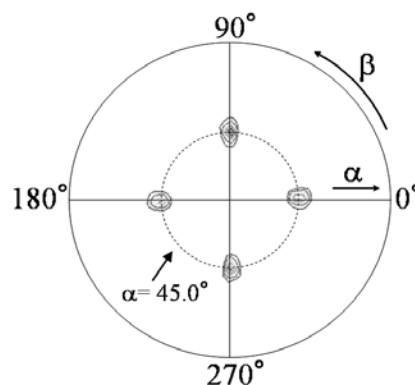


Fig.2 YBCO (103) pole figure for the YBCO/ $\text{CeO}_2/\text{Y}_2\text{O}_3/\text{CeO}_2/\text{Ni}/\text{Cu}/\text{SUS}$ laminated tape

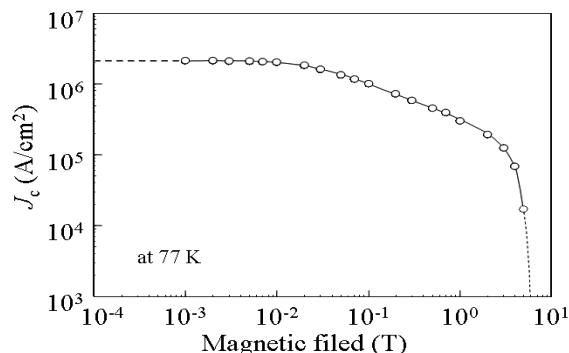


Fig.3 Magnetic field dependence of J_c for the YBCO film prepared on the $\text{CeO}_2/\text{Y}_2\text{O}_3/\text{CeO}_2/\text{Ni}/\text{Cu}/\text{SUS}$ laminated tape.

Niめっき Cu/SUS テープ上への BaZrO₃ 添加 YBa₂Cu₃O₇ 薄膜の作製

Fabrication of BaZrO₃-doped YBa₂Cu₃O₇ thin films on the Ni-electroplated Cu/SUS316 tapes.

勝目 彬人、土井 俊哉、魏 一、宇田 達也、白樂 善則 (鹿児島大学);
 嶋 邦弘、窪田 秀一 (田中貴金属工業); 鹿島 直二、長屋 重夫 (中部電力)
 KATSUME Akihito, DOI Toshiya, GI Ichi, UDA Tatsuya, HAKURAKU Yoshinori (Kagoshima Univ.);
 SHIMA Kunihiro, KUBOTA Shuichi (TANAKA Kikinzoku Kogyo);
 KASHIMA Naoji, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power Co.)
 E-mail : k1435675@kadai.jp

1. はじめに

我々は Cu を基体とする Niめっき Cu/SUS テープ上に YBCO 薄膜を作製し、自己磁場において実用化レベルの高い臨界電流密度 (J_c) が得られることを実証した[1]。しかし、超伝導電力貯蔵装置 (SMES) や変圧器への応用を考えた際、磁場中の J_c 値は十分ではない。そこで今回は磁場中における J_c を更に向上させるために、ピンニングセンターを導入した YBCO 薄膜の作製を行った。

2. 試料および実験方法

まず、SrTiO₃(STO)単結晶基板上で BaZrO₃(BZO)を添加した YBCO 薄膜の作製条件を検討した。次に Niめっき Cu/SUS テープ上に CeO₂/YSZ /CeO₂ 中間層を PLD 法で形成し、そしてその上に BZO を添加した YBCO 薄膜を形成した。BZO を添加した YBCO 薄膜は、1.5wt%BZO 粉末を混合した YBCO 焼結体を用いて作製した。また試料の J_c 、臨界温度 (T_c) は直流四端子法で測定し、表面状態については走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いて観察した。

3. 考察と結果

Fig.1 に STO 上に作製した薄膜の SEM 画像を示す。BZO を添加した YBCO 薄膜は pure-YBCO と同等の析出物もなく、平滑で連続的な膜であることがわかった。

Fig.2 に、STO 単結晶基板上に基板温度 (T_s) を変えて作製した薄膜の自己磁場での $J_c^{s.f.}$ で規格化した J_c の磁場依存性を示す。どの基板温度においても BZO を添加した YBCO 薄膜の方が pure-YBCO より磁場中での J_c の低下が抑制されていることがわかる。また T_s が 780 度のときに最も磁場中での J_c の低下が抑えられることがわかった。

Niめっき Cu/SUS テープ上に作製した BZO を添加した YBCO 薄膜については、当日報告する。

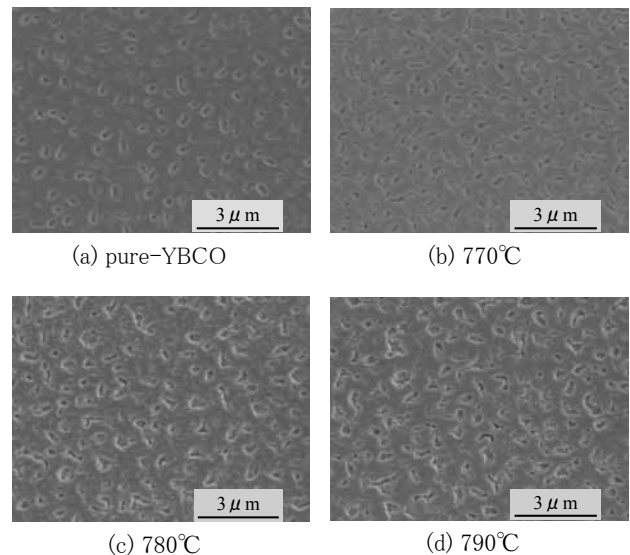


Fig.1 SEM images of pure-YBCO and BZO-doped YBCO thin films : (a) pure-YBCO (b) $T_s=770^\circ\text{C}$, (c) $T_s=780^\circ\text{C}$ and (d) $T_s=790^\circ\text{C}$.

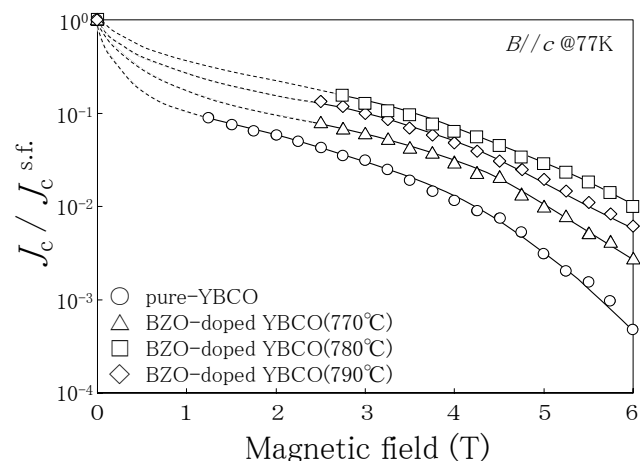


Fig.2 Magnetic field dependences of critical current density in pure-YBCO and 1.5wt%BZO-doped YBCO thin films.

4. 参考文献

[1] Tokudome, *et al.*, J. Appl. Phys. **104**, (2008)103913.

a 軸配向部分を含む YBCO 薄膜の臨界電流の角度磁場依存性

Angular dependence of critical current of c-axis oriented YBCO films including a-axis oriented grains

鈴木 光政, 木口 和哉, 樫尾 卓也, 阿部 雅人, 柏倉 隆之(宇都宮大)

SUZUKI Mitsumasa, KIGUCHI Kazuya, KASIO Takuya, ABE Masato, KASHIWAKURA Takayuki (Utsunomiya University)

E-mail: msuzuki@cc.utsunomiya-u.ac.jp

1. はじめに

YBa₂Cu₃O_{7-δ} (YBCO)は、臨界磁場 B_{c2} が 77K でも高い値を維持するため、線材開発を目指した研究が進められている。YBCO 線材開発の課題の一つに J_c 異方性の問題があり、原因となるピンニング特性に関する研究が、レーザ蒸着膜などについて報告されている。

本研究では、スパッタ法により作製した STO(100)および MgO(100)基板上に作製した部分的に a 軸配向粒を含む YBCO 薄膜について、液体窒素温度領域での J_c 、及びその角度磁場依存性を測定したので報告する。

2. 実験

薄膜の製作には、DC スパッタ装置を用いた。ターゲットは、Y:Ba:Cu=1:2:3 の焼結体円板 (50mm φ × 5mm 厚) である。250Pa の酸素ガス圧、基板温度約 900°C、放電電流 160~200mA で、MgO(100)基板ないし STO(100)基板上に作製している[1]。臨界温度は直流四端子法によって測定した。 J_c を測定するため、薄膜をパターニング処理し、ブリッジを形成した。断熱セル内に試料をセットし、液体窒素温度領域で温度を制御しながら、 J_c を測定した。

3. X 線回折

両試料とも、 T_c は約 90K である。STO 基板上に作製した試料 A ではスパイラル成長のほか、長方形の結晶粒が粒界に特徴的に観察される。MgO 基板上に作製した試料 B では、全面にスパイラル状の YBCO 成長が見られる。試料 A の X 線回折図形を図 1 に示す。YBCO(006)の回折ピークの横に(200)のピークが見られた、図 2 の試料 B では、試料 A よりも小さい(200)ピークが見られた。

4. 臨界電流密度

臨界電流 I_c は、電圧端子間距離 1mm に対して $1\mu V$ 発生した時の値 ($1\mu V/mm$)とした。 J_c の磁場角度依存性を図 3 と 4 に示す。試料 A では $\theta=0^\circ$ (磁場方向が膜面に平行)と $\theta=90^\circ$ (磁場方向が膜面に垂直)の 2 箇所までピークが見られた。低温低磁場において、 $\theta=90^\circ$ の J_c は $\theta=0^\circ$ の J_c 値より高い。また、 $\theta=90^\circ$ でピークを示す幅は大きく、 $\theta=0^\circ$ のピーク幅は高温高磁場になると小さくなっていく。試料 B では、 $\theta=0^\circ$ でのみ強いピークが認められ、 $\theta=90^\circ$ では顕著なピークは認められず、温度あるいは磁場の上昇とともに単純に低下している。

5. まとめ

作製した薄膜は、ほとんど c 軸配向であるが、a 軸配向の部分を含む試料もある。AFM 観察では、a 軸配向を含む試料表面では、長方形の結晶粒が観察され、これが a 軸配向の部分と推測される。基板による違いにかかわらず a 軸配向を部分的に含む試料の J_c 磁場角度依存性では $\theta=0^\circ$ と $\theta=90^\circ$ の 2 箇所までピークが認められた。

参考文献

- M. Suzuki, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 79 (2008) p.80

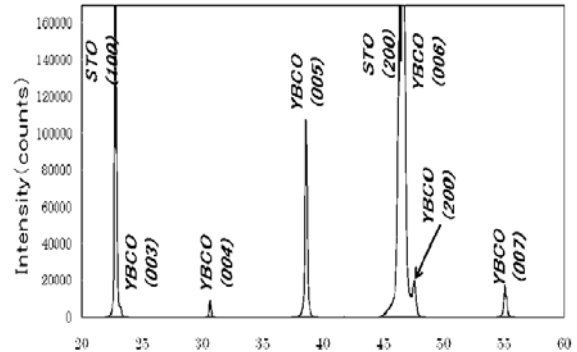


Fig.1 X-ray diffraction pattern of sample A

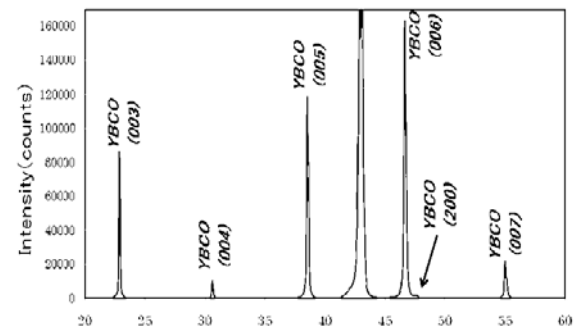


Fig.2 X-ray diffraction pattern of sample B

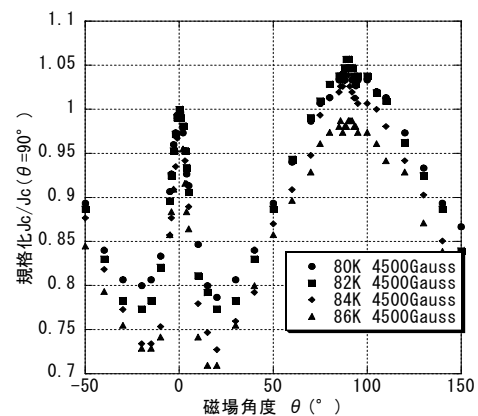


Fig.3 $J_c/J_c(\theta=0^\circ)$ vs. Field angle for sample A

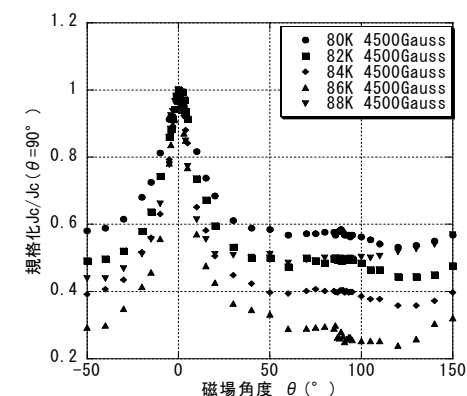


Fig.4 $J_c/J_c(\theta=0^\circ)$ vs. Field angle for sample B

ナノロッドを導入した $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 薄膜の磁束ピンニング特性に対する成膜温度の影響

Effects of deposition temperature on flux pinning properties in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ thin films with nano-rods

春田 正和, 前田 敏彦, 堀井 滋 (高知工大); メレ パオロ, 松本 要 (九工大)
 HARUTA Masakazu, MAEDA Toshihiko, HORII Shigeru (Kochi Univ. Tech.);
 MELE Paolo, MATSUMOTO Kaname (Kyushu Inst. Tech.)
 E-mail: haruta.masakazu@kochi-tech.ac.jp

1. はじめに

$\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (REBCO, RE は Y もしくは希土類元素) 薄膜の作製においてナノロッドの導入は磁場下での臨界電流密度 (J_c) の向上に有効である。これまで、 ErBaCuO 薄膜への BaNb_2O_6 (BNO) 添加により、薄膜中に BNO のナノロッドを導入することに成功している¹。導入されたナノロッドは成膜温度の影響を受け、その形態が変化することが分かってきた。ナノロッドの形態変化により、不可逆線や J_c 特性が成膜温度に依存して変化する。しかしながら、成膜温度変化によるナノロッドの形態と磁束ピンニング特性の関係はよく分かっていない。本研究では、BNO ナノロッドを導入した YBCO 薄膜を成膜温度を変化させて作製し、磁束ピンニング特性を調べた。

2. 実験方法

PLD 法により YBCO 薄膜を STO(100) 単結晶基板上に作製した。BNO を 3.5wt% 添加したターゲットを用いて成膜することにより YBCO 薄膜中に BNO ナノロッドを導入させた。KrF エキシマレーザの発振周波数およびエネルギーはそれぞれ 10Hz および 340mJ であった。成膜中の酸素圧は 200mTorr とし、基板温度 (T_s , 成膜温度) を 770°C から 810°C まで変化させて成膜を行った。成膜後の薄膜は酸素雰囲気中で 425°C のポストアニールを行った。通電特性の測定のため試料を幅 100 μm 、長さ 2mm のストリップライン状に加工した。四端子法による測定を行い、抵抗-温度特性より不可逆線を導出し、電流-電圧特性よりピンニングパラメータを導出した。

3. 結果および考察

Fig.1 に $T_s=770, 780, 790, 810^\circ\text{C}$ で成膜した BNO ドープ YBCO 薄膜の不可逆線を示す。不可逆線は低磁場では下に凸の曲線であるが、ある磁場を境に直線に変化している。この境となる磁場をクロスオーバー磁場 B_{cr} とする。 B_{cr} 以下の磁場では strong-Bose-glass 状態となっていると考えられる²。成膜温度に依存して不可逆線が変化しており、 $T_s=810^\circ\text{C}$ において最も B_{cr} が大きく、磁束グラス領域が広がっている。

測定した E - J 特性を局部的臨界電流密度 (J_{cl}) の分布を考慮したパーコレーション遷移モデル³ に基づく理論式とフィッティングを行い、ピンニングパラメータ m を導出した。Fig.2 に $T_s=790^\circ\text{C}$ および 810°C におけるピンニングパラメータ m の磁場依存性を示す。 m は J_{cl} 分布の形を特徴付けるパラメータであり、また $m+1$ は磁束グラス-液体転移温度 (T_g) における E - J 特性の傾きを表している。 m の磁場依存性において $T_s=790^\circ\text{C}$ では 2T、 $T_s=810^\circ\text{C}$ では 4T 付近にブロードなピークが見られる。 m にピークが見られる磁場では、 J_{cl} の分布がシャープになっていることを表している。このシャープな J_{cl} の分布はナノロッドにより磁束線が効率よくピン止めされていることに起因すると考えられる。

以上のように、不可逆磁場、 E - J 特性を決定付ける J_{cl} の分布が成膜温度に強く依存していることが分かった。このことより、ナノロッドを導入した REBCO 薄膜において、 J_c 特性の向上には成膜温度の最適化が必要である。

謝辞

本研究の一部は科学技術振興機構・研究成果最適展開支援事業 (A-STEP) の助成を受けて実施したものである。

参考文献

1. S. Horii et al., APL **93** (2008) 152506.
2. L. Krusin-Elbaum et al., PRL **72** (1994) 1914.
3. K. Yamafuji and T. Kiss, Physica C **258** (1996) 197.

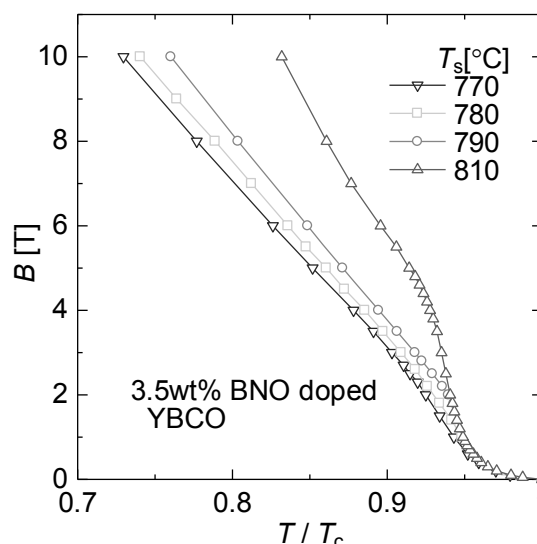


Fig.1 Irreversibility lines for YBCO thin films with nano-rods deposited at 770-810°C.

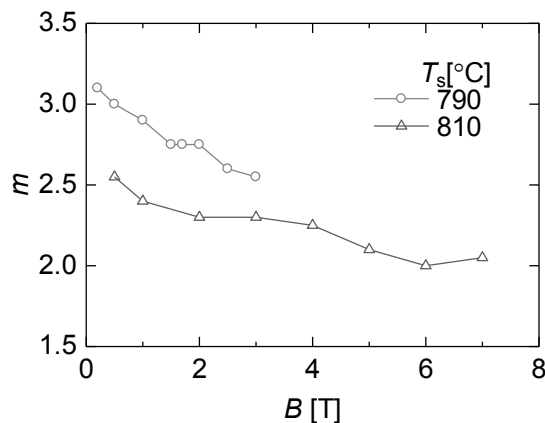


Fig.2 Magnetic field dependences of m for YBCO thin films with nano-rods deposited at 790°C and 810°C.

GdBCO コート線材の臨界電流密度特性の超電導層厚依存性

Thickness dependence of critical current density in GdBCO coated conductors

木内 勝, 和田 純, 鯉田 貴也, 高橋 祐治, 松下 照男(九工大);
 淡路 智, 渡辺 和雄(東北大・金研); 宮田 成紀, 衣斐 顕, 和泉 輝郎(超電導工学研究所)
 KIUCHI Masaru, WADA Jun, TAKAHASHI Yuji, KOIDA Takaya, MATSUSHITA Teruo (Kyushu Inst. of Tech.);
 AWAJI Satoshi, WATANABE Kazuo (Tohoku Univ.); MIYATA Seiki, IBI Akira, IZUMI Teruo (SRL-ISTEC)
 E-mail: kiuchi@cse.kyutech.ac.jp

1. はじめに

現在、高磁界下でも優れた臨界電流密度 J_c を有するRE(希土類)系コート線材の研究開発が精力的に行われ、長尺化への目途が立ってきた。一般的にPLD法で製作されたコート線材は低磁界において優れた J_c を示すが、超電導層の厚さ d の1/2乗に反比例して J_c が減少する[1]。また、低磁界領域での J_c が比較的小さい厚いコート線材においても、高磁界領域では逆に高い J_c となる。これは J_c を決定している磁束線の長さ方向のピンニング相関距離が、超電導層の厚さの影響を受けるためである[2]。すなわち応用用途に沿った、コート線材の最適化が必要になってくる。現在このコート線材を用いて期待される超電導応用機器に超電導コイルがあるが、この場合は線材に様々な方向から磁界が加わることになる。したがって今後の応用機器への利用のためにも超電導層の厚さと J_c の印加磁界角度依存性の関係を詳細に調べる必要がある。本研究では、超電導層の厚さが異なるGdBCOコート線材の J_c の印加磁界角度依存性を測定し、超電導層の厚さがこれらの特性にどのように影響を与えるかを議論する。

2. 実験

本研究で用いたRE系コート線材はPLD法で作製されたGdBCOコート線材で、超電導層の厚さを0.5 μm から2.5 μm まで変化させた5つである。超電導層の厚さと、SQUID磁力計を用いて測定した臨界温度 T_c をTable 1に示す。 J_c は直流四端子法を用いて、東北大学金属材料研究所附属強磁場超伝導材料研究センターの20 Tマグネットを使用して測定を行った。尚、磁界はコート線材の広い面に対して垂直、すなわち c 軸方向を $\theta = 0^\circ$ として定義した。 J_c は $E = 1.0 \times 10^{-4}$ V/m の電界基準を用いて決定した。

Table 1 Specification of specimens

Specimen	#1	#2	#3	#4	#5
Thickness d (μm)	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
T_c (K)	92.5	92.1	92.2	92.3	92.1

3. 結果及び検討

Fig. 1 に 77.3 K における #2 と #5 の J_c の印加磁界角度依存性を示す。磁界が ab 平面に平行である $\theta = 90^\circ$ 近傍では、超電導層が薄い #2 の J_c は角度に対して急峻な変化を示す。一方で、#5 は J_c の値は厚膜化による低下があるが、印加角度依存性は $\theta = 70^\circ$ 近傍から緩やかな変化となる。この傾向は温度の低下と共に顕著となる。これは厚膜化により、この磁界方向で有効となるピンの導入を示唆する。また、 c 軸方向に磁界を加えた場合は、薄い #2 に比べて #5 の J_c の方が大きくなっていることがわかる。

Fig. 2 に 77.3 K と 70.0 K における磁界を ab 平面方向に加えた場合の J_c^{ab} と、 c 軸方向に加えた場合の J_c^c との比である異方性 J_c^{ab}/J_c^c の磁界依存性を示す。この結果から、#5 は厚膜化による $\theta = 90^\circ$ 近傍での J_c の低下はあるが、異方性は小さく、超電導層の薄い線材に比べて高磁界特性が優れていることがわかる。これは c 軸方向の磁界下では、超電導層が薄い線材に比べて厚い方の線材の方が磁

束クリープの影響を受けにくく、 J_c の低下が少ないためである。磁束クリープ理論との比較及び詳細な議論は当日行う。

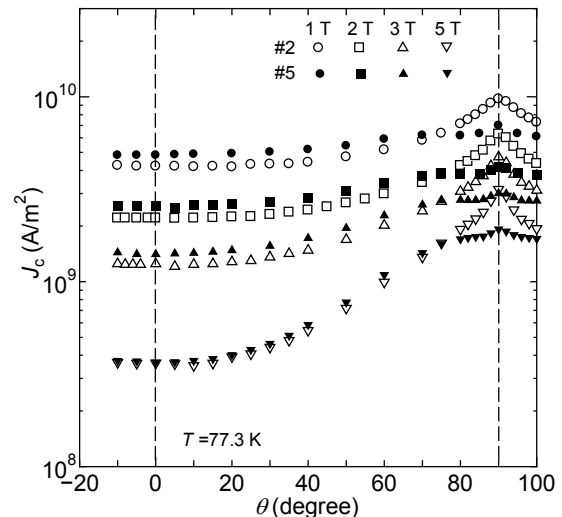


Fig. 1 Angle dependence of critical current density at 77.3 K for specimens #2 and #5.

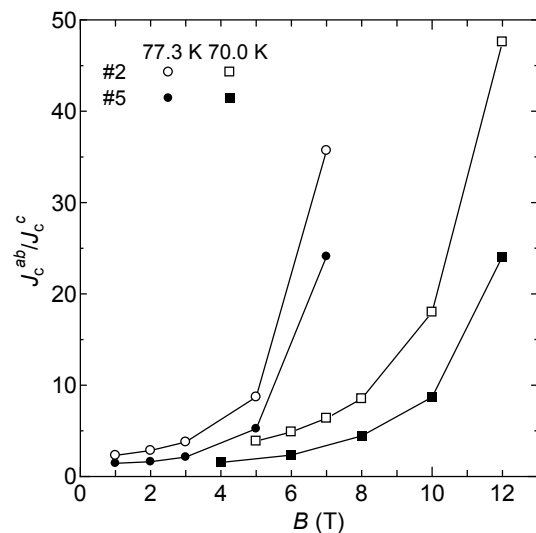


Fig. 2 Comparison of the J_c^{ab}/J_c^c at 77.3 K and 70.0 K between specimens #2 and #5.

謝辞: 本研究は、イットリウム系超電導電力機器技術開発の一環として、ISTECを通じてNEDOからの委託を受けて実施したものである。

参考文献

- S. F. Foltyn et al.: Nature Material **6** (2007) 631.
- T. Matsushita et al.: Supercond. Sci. Technol., **20** (2007) S189-S196.

積層した高温超電導テープ導体の通電交流損失特性に及ぼす磁性基板の影響

Effects of magnetic substrates on AC transport current loss of stacked HTS tape conductors

森本 裕二, 七戸 希, 村瀬 暁(岡山大); 山田 豊(東海大)

MORIMOTO Yuji, NANATO Nozomu, MURASE Satoru (Okayama University); YAMADA Yutaka (Toukai University)

E-mail: yuji_morimoto@power.elec.okayama-u.ac.jp

1. はじめに

超電導体は無損失で直流電流を通電できる反面、交流電流を通電すると損失が発生するという問題がある。したがって、超電導を電気機器等に应用するためには交流損失の対策が必要となり、実際の環境に近い条件での特性を把握する必要がある。実際に用いられる超電導コイルでは通電電流を増やすために高温超電導テープが多層に積層されて使われる。

一般の YBCO テープ線材は磁性基板を有しており、これらの積層パターンの違いによって発生する通電交流損失が変化した[1]。新たに有限要素法を用いた数値解析を行ったところ、それぞれの積層パターンによって磁場分布が著しく異なることが分かった。今回、これらの実験結果と解析結果との比較により、各積層導体の通電交流損失特性について検討を行ったので報告する。

2. 実験方法

Table1 に示す諸元の YBCO 線材を用いた積層導体を作製した。積層パターンは、Fig.1(a)~(c)のように YBCO 線材の磁性基板側同士を貼り付けた Model A、YBCO 層側同士を貼り付けた Model B、磁性基板側と YBCO 層側を貼り付けた Model C の 3 種類とし、層間はカプトンテープにより絶縁を施した。また、比較のために Fig.1(d)~(f)に示す積層導体を作製した。これらの積層導体は Model A~C の超電導層と磁性基板をそれぞれ Table1 に示す諸元の Bi2223 線材と Ni テープに対応させており、積層パターンは Model A~C と Model D~F でそれぞれ対応している。

通電交流損失測定はロックインアンプを用いた位相調整法により行った。試料に接続する電圧タップの接続方法は矩形ループ電圧タップ法を採用した。通電電流の周波数は 60 Hz とし、負荷率を 0.1~0.9 まで変化させ、液体窒素浸漬冷却によって実験を行った。

3. 実験結果及び考察

通電交流損失測定結果を Fig.2 に示す。この結果より、Model A~C では大きな損失差は見られないが、Model A の場合が高く、Model B の場合が最も低く、そして Model C の場合がそれらの中間的な損失値となることが分かった。

Model D~F の通電交流損失を同様に測定したところ、Fig.2 に示すように Model D の場合が最も低く、Model E の場合が最も高く、そして Model F の場合がそれらの中間的な損失値となり、各積層導体間で非常に大きな損失差をもつ結果となった。

Table1 Specifications of the YBCO, Bi2223 and Ni tapes

YBCO tape		Bi2223 tape	
Manufacture	AMSC	Critical current I_c (A) (77 K, 0 T)	76
SC layer : thickness (μm)	YBCO : about 1	Sheath material	Ag
Substrate : thickness (μm)	Ni-5%W : 75	Ag/SC ratio	1.7-1.8
Stabilizer : thickness (μm)	Cu : 50	Width (mm)	2.3
Surface coating : thickness (μm)	Ag sputter : about 1	Thickness (mm)	0.18
Thickness of Buffer stack (μm)	about 1	n value	21
Ni tape			
Average thickness (mm)	0.18-0.22	Width (mm)	2.25
Average width (mm)	4.27-4.55	Thickness (mm)	0.25
Minimum amperage I_c (A)	90		

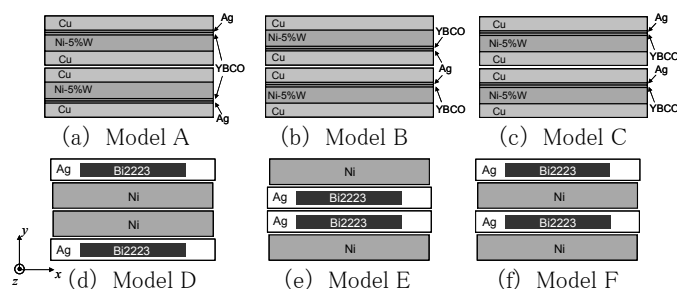


Fig.1 Six models of the stacked HTS tape conductors

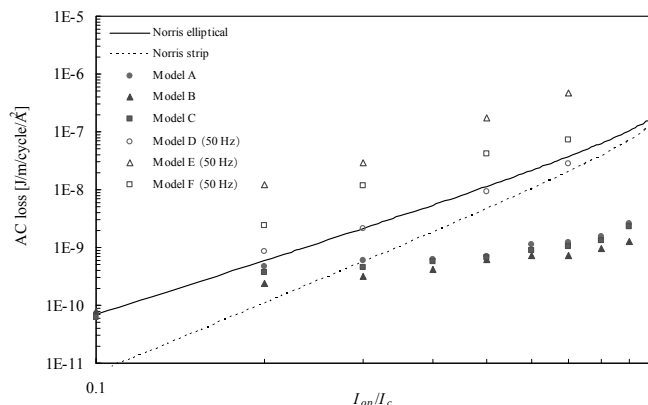


Fig.2 Characteristics of transport current AC loss and loaded current

次に、有限要素法を用いた数値解析により、各積層導体における磁場分布の調査を行い、実験結果との比較を行った。その結果、Model A~F の全てのモデルにおいて超電導体には端部のみに磁場が集中し、磁性体には積層パターンによって磁場の集中度合が変化することが分かった。さらに、Model A~C の磁性体には比較的侵入磁束が少ないことが分かった。したがって、超電導体と磁性体の厚みの差、また積層パターンを変化させると、磁性体への侵入磁束数が変化し、超電導体に流れる電流分布に影響を及ぼすため、Fig.2 のように各積層導体で通電交流損失に差が生じたと考えられる。

参考文献

- Y. Morimoto, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 81 (2009) p.80

RE123 線材の臨界電流の温度・磁場依存性とコイル化の検討

Temperature and magnetic field dependence of critical current of RE123 coated conductor and its coil

本間 久雄, 山田 穰, 山田 雄一, 大熊 武, 和泉 輝郎, 塩原 融 (ISTEC); 岩熊 成卓 (九大)
 HOMMA Hisao, YAMADA Yutaka, YAMADA Yuichi, OHKUMA Takeshi, IZUMI Teruo, SHIOHARA Yuh (ISTEC);
 IWAKUMA Masataka (Kyushu Univ);
 E-mail: h-homma@istec.or.jp

1. はじめに: 近年、Y系線材の長尺量産化は一層進んできている。しかしながら、機器応用には、まだ、種々の課題が残っている。例えば、応用機器の小型、高効率化を行うため冷凍機による伝導冷却により超電導コイルを20~30Kに冷却して使用することが想定され、その臨界電流を予測するためには線材の温度、磁場依存性が重要である。今回、RE123線材の臨界電流 I_c 、の温度、磁場依存性を検討し、その結果を基に前回[1]60Kで安定性評価を行ったパンケーキコイルの臨界電流分布の温度依存性を検討した。

2. 試料及び評価方法: 1) 線材の I_c の温度、磁場依存性: 100 μ m 厚の Hastelloy 基板、IBAD バッファ層 GZO/IBAD-MgO/LMO/CeO₂、GdBCO 超電導層 2 μ m、Ag スパッタ層 20 μ m 構造で I_c (@77K, s.f.)が500~600A/cm幅の線材をエッチングにより幅40~60 μ m、長さ1mmのブリッジ部と3mm角の電極部のパターンを形成した。加工後の I_c は、380A/cmであった。冷凍機による伝導冷却で試料を温度コントロールし、温度30、40、50、60、65、77K、磁場0、1、3、5T、磁場角度は試料のc軸に垂直な面を0度として、60~210度で I_c を測定した。 I_c 測定は、4Hzの三角波を入力し、ブリッジ間の発生電圧10 μ V/mmで I_c を定義した。2) パンケーキコイルでの I_c 分布: 上記線材構造のものにCuメッキ30 μ mした長尺50m線材を用いた内径80mm、外径154mm、高さ6mm、巻き数134ターンのコイルを対象にして、電流を通电した時の磁場分布を計算し、1)の結果からコイル各部分での線材の I_c を求め、通電電流の差(尤度)を評価した。

3. 結果: Fig.1に5Tの I_c の温度依存性の検討結果及び文献値[2]を示す。 I_c (77K, 0T)の値で規格化した。温度30Kで I_c (77K, 0T)の5倍、40Kで2~3倍と磁場中にも関わらず、高い I_c が得られた。

I_c の磁場角度依存性では、160度から200度近傍で I_c 分布が一旦平坦となり、180度近傍のみ I_c が高くなっている分布が見られた。この平坦部から上に凸の角度範囲を $\Delta\theta$ として、その温度依存性をFig.2に示す。高温では $\Delta\theta$ が10度以下であったが、30Kでは28度まで広がった。すなわち、 I_c が角度の影響を受ける領域が低温ほど広がる。コイルの温度を変えると、コイル内の I_c 分布が変化することを示している。

Fig.3.にコイルの60Kと30Kでの I_c 分布を示す。 I_c 分布はコイル中心を含む4分の1断面で各温度でのコイル内の I_c 分布を示している。60Kでは、コイルの内径から2mmの位置で磁場角度30度の部分で最も低い I_c となったが、30Kでは、内径から6mm、磁場角度43度の部分が最も低い I_c となり、全体の I_c 分布も大きく変化している。これは、低温になるに従い、磁場の角度による影響が大きくなったためである。

4. まとめ: 1) I_c が500~600AのY系線材にマイクロブリッジ加工を施して、低温での I_c 測定を行ったところ、30K、5T中で77K、自己磁場に比べ、5倍の高い I_c を示すことがわかった。また、低温になるに従い、角度依存性に大きく影響する範囲が広がることがわかった。これは、温度によりコイル内の臨界電流分布が変わることを示している。

2) シングルパンケーキコイルにて30Kと60Kの臨界電流の分布を検討したところ、臨界電流の最小となる位置が内径側から外径側へ移動し、内部の分布も大きく変化した。

5. 謝辞: ISTEC中尾氏には伝導冷却下での I_c 測定のご指導、株式会社 東芝にはコイルの試作・評価をして頂き、感謝致します。本研究は、「イットリウム系超電導電力機器技術開発プロジェクト」の一部としてNEDOの委託により実施したものである。

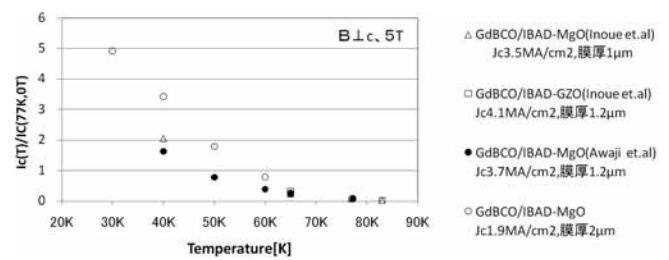


Fig.1 Relationship between temperature and critical current at 5T perpendicular to c-axis.

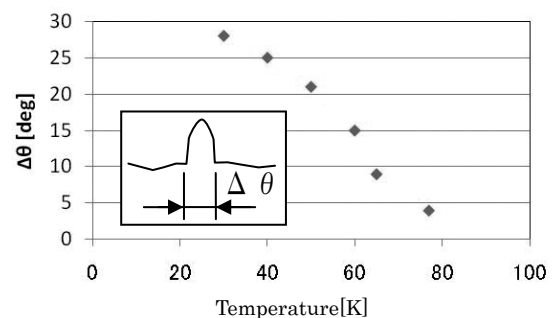


Fig.2 Relationship between temperature and $\Delta\theta$.

$\Delta\theta$: characteristic angle range in I_c - θ (magnetic field angle).

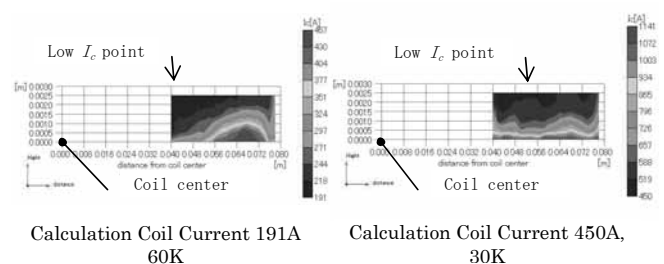


Fig.3 Critical current distribution of quarter coil model at 60K and 30K.

参考文献:

- [1] H. Homma, et.al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 82 (2010) p.153
 [2] R. Fuger, M. Inoue, et.al.: Evaluation of current transport properties of GdBa₂Cu₃O_{7- δ} coated conductors over a wide range of temperature and external magnetic fields, Journal of Physics: Conference Series 234(2010)022009

Mg(BH₄)₂ の熱分解による MgB₂ の作製

Preparation of MgB₂ through the decomposition of Mg(BH₄)₂

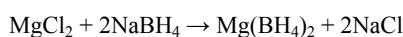
藤井 宏樹, 小澤 清, 熊倉 浩明(NIMS)

FUJII Hiroki, OZAWA Kiyoshi, KUMAKURA Hiroaki (NIMS)

E-mail: fujii.hiroki@nims.go.jp

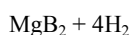
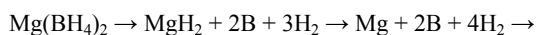
(序) MgB₂ 線材は、一般的に PIT 法で作製されているが、優れた J_c 特性を得るためには結晶粒間結合の強化が重要である。そのために、原料粉のうち、Mg 源には様々な工夫がなされている。一方、B 源としては、輸出規制の対象となっている米国製アモルファス B(a-B)を使用せずに、それを凌ぐ特性を達成するのは困難な状況である。本研究ではこの a-B を用いずに Mg(BH₄)₂ の熱分解によって MgB₂ を作製し、PIT 法用充填粉への適用の可能性を検討した。

(実験) 以下の反応式に従って先ず Mg(BH₄)₂ を得た。



上記出発原料を遊星ボールミルで 20h、1:2 の比で混合した後、その粉末をエーテル中 48h 還流させた。続いて濾過し、その粘性濾液を種々の温度で乾燥させて白色粉末を得た。更にこの粉末を Ar 気流中、種々の温度で加熱分解させた。

(結果) 種々の温度で乾燥して得られた生成物の XRD 図から、180°C 以下では低温相である α-Mg(BH₄)₂ が得られ、220°C では高温相の β-Mg(BH₄)₂、300°C ではアモルファス相が得られた。β-Mg(BH₄)₂ を種々の温度で乾燥させた生成物の XRD 図を Fig. 1 に示す。300°C で MgH₂ が生成し、350°C で更に Mg が生成する。450°C で Mg と B の反応が起こり、500°C で MgB₂ がほぼ単相で得られ、通常の Mg と a-B での反応と同程度の体積分率であった。以上の反応は、以下のように進むものと考えられる。



また、最初の物質が α-Mg(BH₄)₂ でもアモルファス相でも、最終生成物はほぼ単相の MgB₂ であった。

Fig. 2 に Fig. 1 の XRD 図に対応した生成物の dc 磁化曲線を示す。400°C 以下では MgB₂ が生成しておらず、反磁性のシグナルは観測されないが、450°C で観測され、500°C 以上では大きなシグナルが観測された。また、その T_c は 35K 程度であった。この T_c は MgB₂ の報告値 39K よりも低い。XRD 図から MgB₂ の 110 ピーク位置が 0.2° 程高角度側にシフト、即ち、a 軸長が縮んでいることが明らかとなった。これは炭素

置換によるものと示唆され、この炭素置換が T_c 低下の要因となっているものと考えられる。

以上のことから、本手法は PIT 法線材作製に適用可能であると思われる。

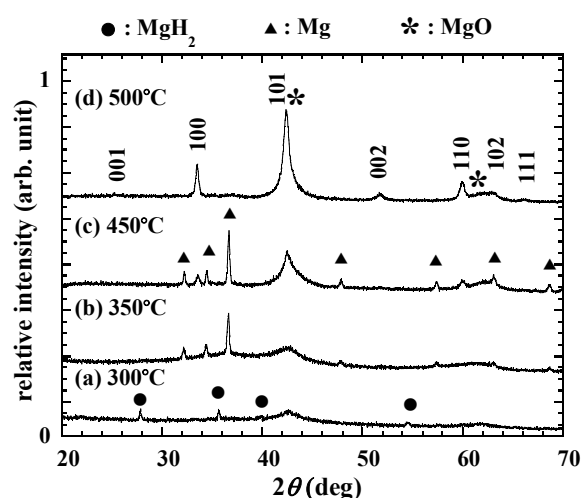


Fig. 1. XRD patterns of β-Mg(BH₄)₂ heat treated at various temperatures in a flow of Ar gas. XRD peaks assigned to MgB₂ are indexed.

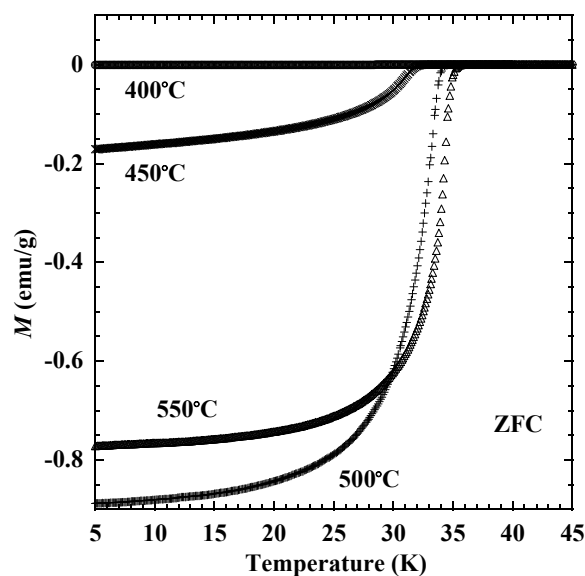


Fig. 2. Temperature-dependent dc magnetization curves for β-Mg(BH₄)₂ heat treated at various temperatures in a flow of Ar gas. The data were collected in a field of 10 Oe in a zero-field-cooling (ZFC) mode.

Hemoglobin を添加した MgB₂ バルクの超伝導特性

Superconducting Properties in MgB₂ Bulks Synthesized by Hemoglobin Addition

中山 佳威, 笠原 清太郎(日本大学理工学部); 前田 穂(University of Wollongong); 久保田 洋二(日本大学理工学部)
 NAKAYAMA Yoshitake, KASAHARA Seitaro (Nihon Univ.); MAEDA Minoru (UOW); KUBOTA Yoji (Nihon Univ.)
 E-mail: MPD@nihon-u.ne.jp

1. はじめに

金属系超伝導体の中で最も高い T_C を持つ MgB₂ に対して、 J_C を向上させるための様々な研究が行われている。 J_C の改善には、添加剤として Vitamin C 等の炭素を含んだ化合物が有効であることが報告されている。^[1]

我々は、MgB₂ の添加剤として高分子の有機物である Hemoglobin(以下 Hb と記す)を用い、その割合を系統的に変化させた MgB₂ バルクを作製し、その結晶性と超伝導特性を調べたので報告する。

2. 実験

用いた試薬は、B(99%, <1 μ m), Mg(99.99%, 3-5mm) と Hb である。Hb の MgB₂ に対する重量パーセントが 0, 2.5, 5, 10 に対応するように、Hb と B をそれぞれ秤量する。これらに対応する Hb と B の組合せを別々に混合する。これら 3 種類の混合粉と B 単体を別々に短冊状のプレス型に入れ、9t で 10 分間加重し、成型体を作製する。これらを Ar 雰囲気中で Ta 管に詰め、モル比で Mg:B=1:1 になるように Mg 粉末を添加した後アーク溶接で Ta 管を封管する。この Ta 管を石英管に真空封入する。Hb 無添加の成型体は 1100 $^{\circ}$ C-5 分と 710 $^{\circ}$ C-6 時間の 2 段階熱処理を行い、Hb 添加の成型体は 1100 $^{\circ}$ C-5 分と 710 $^{\circ}$ C-24 時間の 2 段階熱処理を行う。最後に残留 Mg を取り除くために、この Ta 管に穴をあけた後、石英管に真空封入し、695 $^{\circ}$ C-30 分の熱処理を加え、試料とする。試料の緒元を Table 1. に示す。

試料の表面形状、組成及び J_C は SEM, XRD, SQUID を用いて調べる。

Table 1. Specification of samples

Sample	Hb/MgB ₂ (wt%)	Heat Treatment
#1	0	1100 $^{\circ}$ C-5min and 710 $^{\circ}$ C-6h
#2	2.5	1100 $^{\circ}$ C-5min and 710 $^{\circ}$ C-24h
#3	5	1100 $^{\circ}$ C-5min and 710 $^{\circ}$ C-24h
#4	10	1100 $^{\circ}$ C-5min and 710 $^{\circ}$ C-24h

3. 結果

Fig. 1. に #1, #2, #3, #4 の 15K 倍の SEM イメージを示す。図より、#1 よりも #2, #3, #4 と Hb の添加量の増加と共に、MgB₂ の粒径が 0.4 μ m から 0.2 μ m まで細かくなっている。また、MgB₂ 粒同士の密着性がよくなっているようである。

XRD パターンから、すべての試料の主相は MgB₂ であり、わずかな MgO があるが、ほぼ単相試料であることがわかった。リートベルト解析より求めた各試料の格子定数 a は、Hb 濃度の増加とは逆に、 a は縮小している。また、MgB₂ の (1 1 0) 面の半値幅は Hb 濃度とともに増加し、結晶性が劣化していることを示している。

Fig. 2. に 20K における J_C の直流磁場依存性を示す。 J_C は SQUID で測定した磁化曲線より、拡張された Bean モデルを用いて計算した。Hb 濃度の増加と共に低磁場側では J_C が減少するが、高磁場側では逆に J_C が増大し、試料 #2 の J_C が最も大きくなった。

Fig. 3. に各試料の $T_C(B)$ と T_{irr} の Hb 濃度依存性を示す。低磁場では、 $T_C(B)$ と T_{irr} は Hb 無添加試料の #1 が高いが、高磁場側では、Hb 添加試料の #2, #3 が #1 より高くなっている。

以上のことより Hb の添加は、MgB₂ 粒を微細化し、結晶粒界面を増大させ、また、 a 軸長を縮めることにより、電子散乱が増

大し、 J_C 、 $T_C(B)$ や T_{irr} が高磁場側で改善したと考えられる。しかし、Hb 濃度が 10wt% まで増大すると $T_C(B)$ の減少が大きくなり、 J_C が減少している。詳細な検討は当日報告する。

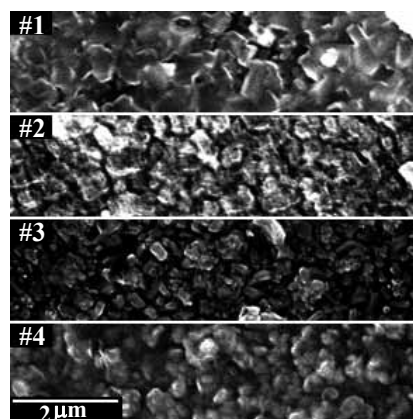


Fig. 1. SEM images of MgB₂

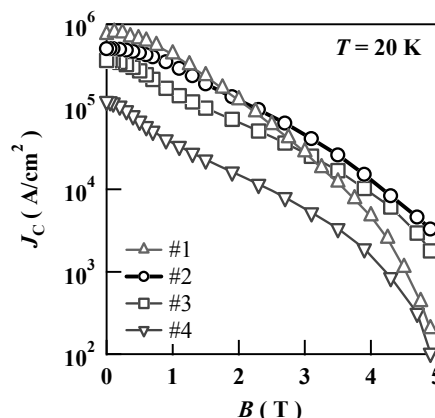


Fig. 2. J_C vs. B for all samples

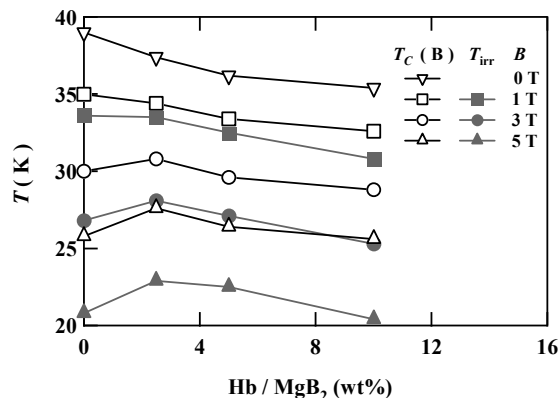


Fig. 3. T_{irr} and $T_C(B)$ vs. Hb / MgB₂ for all samples

参考文献

1. Y. Nakayama, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol.82 (2010) p.119

Vitamin B₁₂ を添加した MgB₂ バルクの超伝導特性 Superconducting Properties in MgB₂ Bulks Synthesized by Vitamin B₁₂ Addition

鈴木 将友, 中山 佳威(日大理工); 前田 穂(University of Wollongong); 久保田 洋二(日大理工)

SUZUKI Masatomo, NAKAYAMA Yoshitake (CST, Nihon Univ.); MAEDA Minoru (UOW); KUBOTA Yoji (CST, Nihon Univ.)

E-mail: csma07087@g.nihon-u.ac.jp

1. はじめに

MgB₂ 超伝導体の実用化には、更に臨界電流密度 J_C を向上させる必要がある。

ここでは、微細な C を添加するために有機物の Vitamin B₁₂ (VB₁₂) を用い[1]、その割合を系統的に変化させた MgB₂ バルクを作製し、その超伝導特性を報告する。

2. 実験

用いた試薬は B (99%, 45 μ m), Mg (99.99%, 3-5mm), Mg 粉末 (99.9%, 150 μ m) と VB₁₂ (min 95%, 粉末) である。

はじめに、Table 1 に示す割合で Mg 粉末、B と VB₁₂ を Ar ガス中で 40 分間混ぜ合わせて 4 種類の混合粉を作製する。これらを別々に短冊状のプレス型に入れ 9t で 10 分間加重し、圧粉体を 4 個作製する。それぞれの圧粉体に Mg を添加してモル比が B : Mg = 1 : 1 になるように Ta 管に入れ、Ar 雰囲気中でアーク溶接し、封管する。これらの Ta 管を石英管に真空封入し、熱処理温度 $T = 1100^\circ\text{C}$ で熱処理時間 $t = 5$ 分間の熱処理の後、続いて 710 又は 760 $^\circ\text{C}$ で 6, 14, 24 時間の熱処理(二段階熱処理)を行った。その後 695 $^\circ\text{C}$ で 30 分間の熱処理で残留 Mg の除去を行い、試料を作製した。試料の組成と超伝導特性は、それぞれ XRD と SQUID で評価した。

Table 1 に作製した圧粉体を示す。VB₁₂ と B の質量比が 0, 5.3, 10.6, 21.2wt% の圧粉体を 4 種類用意した。

Table 2 に MgB₂ 試料の作製に用いた二段階熱処理の条件を示す。

Table 1 Pressed mixtures

Mixture	Mg powder (wt%)	B (wt%)	VB ₁₂ (wt%)
#1	8.4	100	0
#2	8.4	100	5.3
#3	8.4	100	10.6
#4	8.4	100	21.2

Table 2 Heat treatment conditions

Condition	1st stage		2nd stage	
	T ($^\circ\text{C}$)	t (min)	T ($^\circ\text{C}$)	t (h)
1	1100	5	710	6
2	1100	5	710	14
3	1100	5	710	24
4	1100	5	760	6
5	1100	5	760	14
6	1100	5	760	24

3. 結果

Fig.1 に試料の XRD のパターンを示す。これより全ての試料の主相は MgB₂ であり、不純物の MgO は VB₁₂ の量にはほとんど依存していないことが分かる。

Fig.2 に VB₁₂ の濃度が異なる試料で、20K での最大の J_C 対

外部磁場 B_{ex} のグラフを示す。低磁場では VB₁₂ の無添加の試料が高い J_C を示すが、2.5T 以上では VB₁₂ を 5.3wt% 添加した試料が最も高い J_C を示している。また VB₁₂ を 10.6, 21.2wt% 添加した試料でも高磁場では無添加の試料と同じ程度かそれ以上の J_C を示した。

#1,2,3,4 で作製した試料の密度の平均は、それぞれ 1.85, 1.68, 1.47, 1.36g/cm³ となっていて、VB₁₂ 濃度が高くなると減少する。またそれぞれの最大 J_C は、各々の VB₁₂ 濃度の平均密度以上であり、密度に比例して高くなる傾向がある。

詳細な検討は当日報告する。

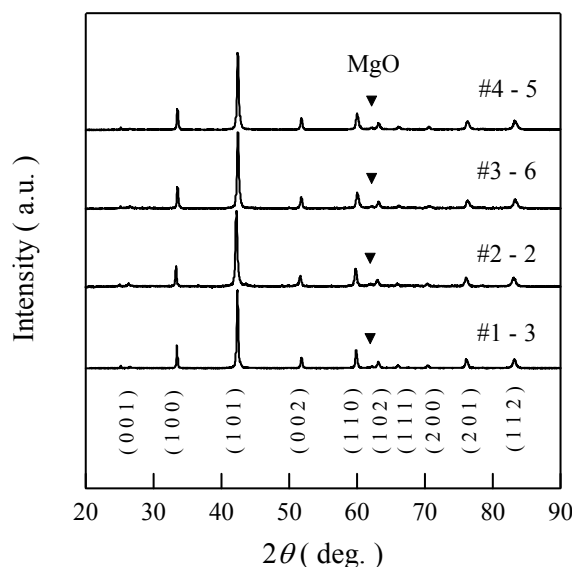


Fig.1 XRD patterns

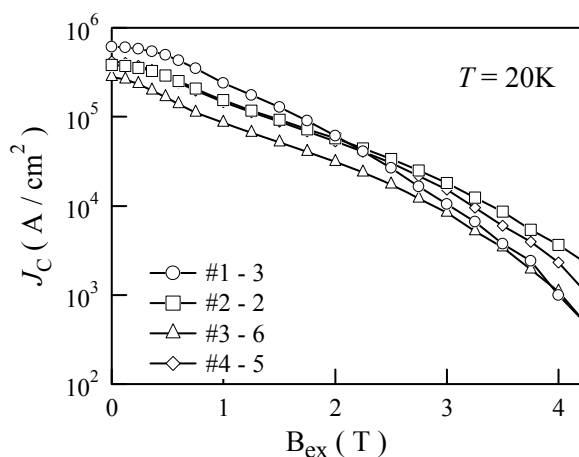


Fig.2 J_C at 20K vs. B_{ex}

参考文献

1. Y. Nakayama, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 82 (2010) p.119

Al テープ上への MgB₂ 薄膜の作製と特性評価Fabrication of MgB₂ thin films prepared on Al tapes and their properties

吉原 和樹、土井 俊哉、永峯 知明、白樂 善則 (鹿児島大学);
藤吉 孝則 (熊本大学); 波多 聡、嶋田 雄介、池田 賢一、中島 英治 (九州大学); 北口 仁 (物質・材料研究機構)

YOSHIHARA Kazuki, DOI Toshiya, NAGAMINE Noriaki, HAKURAKU Yoshinori (Kagoshima University);
FUJIYOSHI Takanori (Kumamoto University); HATA Satoshi, SHIMADA Yusuke, IKEDA Ken-ichi,
NAKASHIMA Hideharu (Kyusyu University); KITAGUCHI Hitoshi (National Institute for Materials Science)
E-mail: k4658264@kadai.jp

1. はじめに

超伝導 MgB₂ は臨界温度 T_c が金属系超伝導体の中で最も高く、世界中で高 J_c 化の研究が行なわれている。MgB₂ 線材の主な作製手法である PIT 法では、MgB₂ 結晶粒間の接合性が悪いため、実用レベルの J_c が得られていない。本研究では薄膜形態の MgB₂ 線材の実用化の可能性を検討するため、Al テープ上に MgB₂ 薄膜を作製し、その特性について評価した。

2. 実験方法

MgB₂ 薄膜は異なる温度(200, 220, 250, 280°C)に加熱した Al テープ上に電子ビーム蒸着装置を用いて作製した。薄膜の組成は、原料である Mg と B の蒸着速度を独立にコントロールすることで制御し、MgB₂ 薄膜の膜厚は 250 nm とした。 J_c (J_c)の測定は直流 4 端子法を用いて行なった。4.2 K での測定は 6 mm 幅の試料そのまま測定し、20 K における測定はエッチング技術によりブリッジを形成してから行った。(4.2 K で測定したものと同一 MgB₂ 薄膜を用いることができなかったため、20 K での測定には同一条件で作製した別の MgB₂ 薄膜を使用した。)

3. 結果と考察

Fig.1 に X 線回折測定結果を示す。220°C~280°C で作製した MgB₂ 薄膜において Al テープからの回折ピーク以外には MgB₂ の(001)面と(002)面からの回折ピークしか観測されなかった。このことから c 軸配向 MgB₂ 薄膜が作製できていることが確認できる。

Fig.2 に磁化の温度依存性を示す。作製した MgB₂ 薄膜はいずれも反磁化を示すことから超伝導転移していることが確認できた。特に、基板温度 220°C で作製した薄膜の T_c は 29.8 K と、作製した薄膜の中で最も高い T_c を示した。

Fig.3 に基板温度 220°C で作製した MgB₂ 薄膜の 4.2 K、20 K における J_c の磁場依存性を示す。4.2 K、低磁場(<2 T)における J_c は 56 A を超えていたため、電流端子からの発熱が大きく、正確な値が測定できなかった。また、外部磁場 10 T においても 1 MA/cm² 以上の J_c を有していた。20 K における J_c は、外部磁場 0 T において 1.2 MA/cm²、4 T において 0.21 MA/cm² と高い値を示した。これらは、従来の PIT 法で作製されている MgB₂ 線材の J_c に比べ、0 T において 10 倍以上、4 T においては 100 倍以上高い値を示している。高い J_c が得られた理由は、従来の PIT 法で作製された MgB₂ 線材に比べて、薄膜形態では MgB₂ 結晶粒間の接合性が向上したことが考えられる。以上の結果から、薄膜形態で MgB₂ 線材を作製することには大きな可能性があるものと考えられる。

謝辞 本研究の一部は科学研究費補助金 21560689 の助成を受けて実施されたものである。

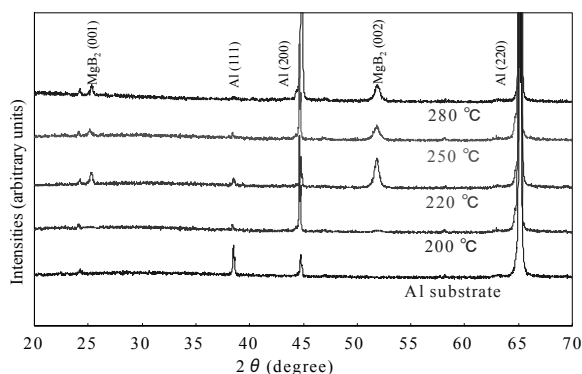


Fig.1 X-ray diffraction spectra of the MgB₂ thin films prepared at different substrate temperatures of 200, 220, 250 and 280°C

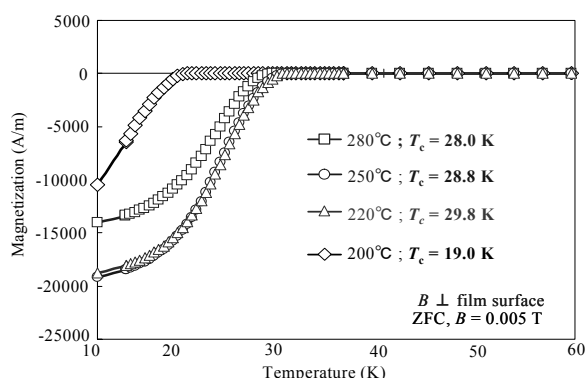


Fig.2 Temperature dependences of the magnetization of the MgB₂ thin films prepared at different substrate temperature of 200, 220, 250 and 280°C

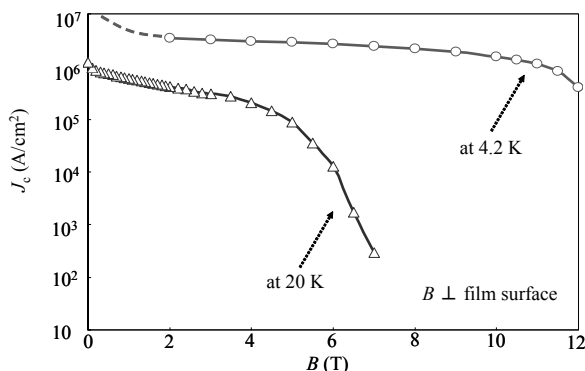


Fig.3 Magnetic field dependence of J_c measured at 4.2 K and 20 K for the MgB₂ thin film prepared at 220°C.

エアロゾルデポジション法で作製した MgB₂ 薄膜の特性 Properties of MgB₂ films fabricated with aerosol deposition method

谷口 修一郎, 神宝 陽太郎, 中山 千秋, 腰塚 直己(芝浦工大); 金 讚中(韓国原子力研究所);
廣瀬 伸吾, 明渡 純(産総研); 村上 雅人(芝浦工大)

TANIGUCHI Shuichiro, SHIMPO Yotaro, NAKAYAMA Chiaki, KOSHIZUKA Naoki (SIT); KIM Chan Joong (KAERI);
HIROSE Shingo, AKEDO Jun (AIST); MURAKAMI Masato (SIT)
E-mail: m209033@sic.shibaura-it.ac.jp

1. はじめに

エアロゾルデポジション(AD)法は、原料微粒子を室温で固体状態のまま、基板に衝突させて緻密膜を形成する手法であり、従来の成膜法のような高温熱処理を必要としないという特徴がある。そのため、原料微粒子材料の特性を保った成膜が可能となる [1][2]。

MgB₂は、金属系超伝導体として39Kの高い臨界温度(T_c)を有し、酸化物超伝導体の応用時に課題となる結晶粒の配向制御が軽減されるため、薄膜や線材形状での実用化が比較的容易であると期待されている。

本研究では、MgB₂粉末を用いて、AD法によりMgB₂薄膜を作製し、微細構造、超伝導特性などの試料評価を行った結果を報告する。

2. 実験方法

原料粉末として平均粒子径1 μ m、純度99%のMgB₂粉末を用いた。成膜基板としては、アルミナ基板を使用した。

Fig.1にAD法による成膜装置の概略図を示す。成膜チャンパーは、真空ポンプによって100Paに減圧される。エアロゾル発生器内に原料粉末を充填し、Heガスと混合させてエアロゾル状態とする。エアロゾル中の原料粉末は、成膜チャンパーとエアロゾル発生器の圧力差で生じるガス流によって成膜チャンパーに搬送され、スリット状ノズルの通過により加速して、基板に高速噴射される。X-Yステージによって基板を移動しながら噴射することで、MgB₂薄膜を作製した。

作製した薄膜について、X線回折(XRD)を用いて相分析を、走査型電子顕微鏡(FE-SEM)を用いて、薄膜表面および断面の形状観察を行った。また、SQUIDを使用して超伝導特性評価を行った。

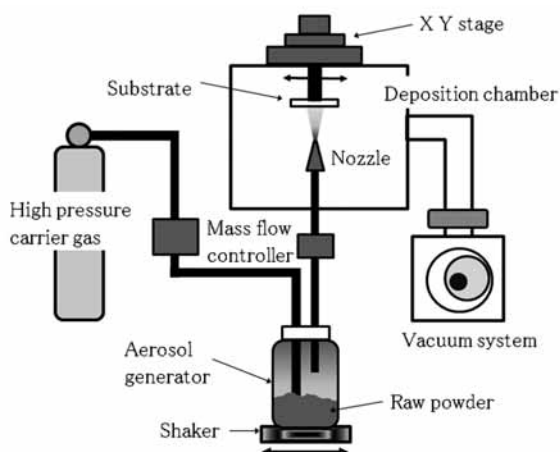


Fig.1 Schematic illustration of aerosol deposition system

3. 結果及び考察

Fig.2に原料粉末およびAD法により作製したMgB₂薄膜のXRDパターンを示す。薄膜のピークは、原料粉末と同位置にあり、原料の組成を保ったまま成膜できていることが分かる。また、(001)および(002)各面での相対的なピーク高さが、原料

粉末に比べて高くなっていることから、薄膜化の段階でc軸配向の傾向があることを示唆している。

Fig.3に磁化の温度依存性を示す。反磁性シグナルが39Kにおいてみとめられ、超伝導臨界温度が39Kに達することが分かる。本結果は、AD法が熱処理を必要とせずに、高性能のMgB₂膜を合成するプロセスとして、非常に有効であることを示している。

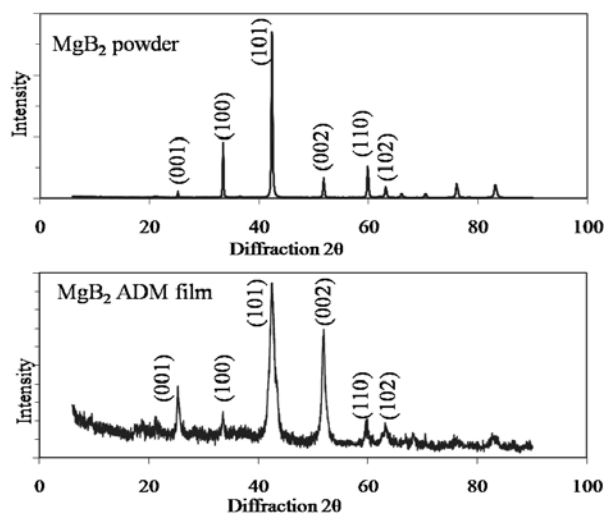


Fig. 2 X ray diffraction patterns for MgB₂ raw powder and Mg B₂ thin film fabricated with AD method.

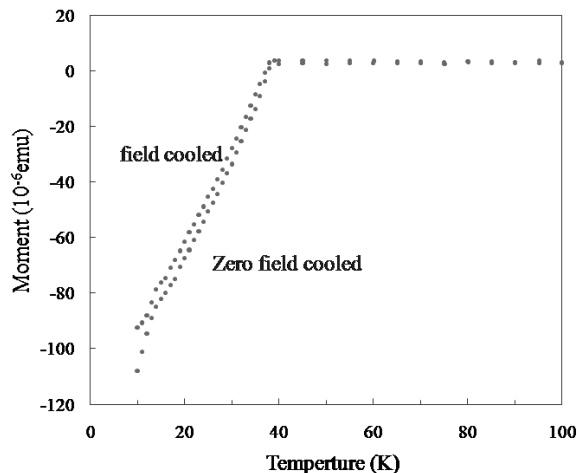


Fig.3 M-T curve of MgB₂ film

謝辞

本研究において超伝導特性評価で御協力いただきました、SRLの町敬人博士に深く感謝いたします。

参考文献

1. J. Akedo, M. Lebedev: *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 38 (1999) p.5397-5401
2. J. Akedo: *J. Therm. Spray Technol.*, Vol.17 (2008) p.181-198

MgB₂ 粒子を Al 母相中に分散させた超伝導複合材料の母相への In 添加の影響

Effect of Indium addition on matrix of MgB₂ particle-dispersed Al based composite materials.

水谷 学(富山大・院生);松田 健二, 西村 克彦, 川畑 常真(富山大);
菱沼 良光(NIFS);青山 茂樹(日軽新潟株);池野 進(富山大)

MANABU Mizutani; KENJI Matsuda, KATSUHIKO Nishimura, TOKIMASA Kawabata (Toyama University);
YOSHIMITSU Hishinuma (NIFS); SHIGEKI Aoyama (Nikkeiniigata); SUSUMU Ikeno (Toyama University)
E-mail: ikenolab@eng.u-toyama.ac.jp

1. 緒言

我々はこれまで、アルミニウムと MgB₂ 粒子との複合材料ビレットを作製し、押出加工により棒材や線材を得て、それぞれの複合材料が MgB₂ 単体と同様の 37~39K の T_c を示すことを報告してきた[1-2]。本実験では、MgB₂ の J_c の改善が報告されている In[3]を母相の純 Al に添加することで、MgB₂/Al 複合材料の J_c の向上を図り、その複合材料の組織を観察したので、それらの結果を報告する。

2. 実験方法

使用した粒子は株高純度化学研究所製の粒径 40 μm 以下の MgB₂ 粒子を用いて直径が 30mm で高さが 42mm のプリフォームを作製し、金型の中に入れ金型を所定の温度に加熱した。その後大気中であらかじめ溶解した 99.99mass%純度のアルミニウム溶湯を金型の中に注ぎ、黒鉛の蓋を置き、上部より油圧プレスにて加圧することによりプリフォーム中にアルミニウム溶湯を加圧浸透させる方法を用いてビレットを作製した。母相への In 添加は、純 Al を溶解させた際に溶湯中に所定量の In を投入し、攪拌後 15 分間保持したものを使用することで行なった。複合材料は In 添加量を未添加、0.05、0.1、0.2、10wt.%の 5 種類作製した。組織観察用試料は、走査型電子顕微鏡 (SEM) 観察はビレットをマイクロカッターにて切断した後、耐水研磨紙で機械研磨し、観察面を鏡面処理して作製し、透過型電子顕微鏡 (TEM) 観察はビレットをマイクロカッターにて切断後、機械研磨し、日立製 FB-2100 集束イオンビーム加工装置 (FIB) を用いて作製した。観察には SEM は Oxford Opal を備えた日立製 S-3500H、TEM はトプコン製 EM-002B、JEOL 製 4010T を用いた。電気抵抗率の温度依存性は、カンタムデザイン社製物理特性測定システム (PPMS) で直流四端子法により、温度 2K から 300K の領域で測定した。磁化の温度・磁場依存性はカンタムデザイン社製物理特性測定システム (SQID) を用いて測定した。

3. 実験結果

Fig.1 は作製した MgB₂/Al-0.1mass%In のビレットの縦断面の接写である。灰色のコントラストの領域が複合している部分であり、写真の両端の白色のコントラストは母相の Al の領域である。図は省略するが、適切な作製条件で作製されなかった場合のビレットには大きな空隙が確認された。これはプリフォーム中に溶湯が浸透しなかった部分で、ビレットを切断する際に粒子が抜け落ちたためにできたと考えられた。Fig.1 からはこれらの欠陥は見受けられず、適切な条件で作製することができた。

Fig.2 は、Fig.1 の縦断面の一部を拡大した SEM 像である。この写真からも巣や溶湯の未浸透部分などの欠陥は見受けられなかった。MgB₂ 粒子の黒色のコントラストと、母相である Al の白いコントラストが確認された。粒子のコントラストは比較的均一に分散していることが分かる。

図は省略するが、複合材料の磁化率の温度依存性を測定した結果、純 Al 母相の複合材料と Al-In 母相の複合材料それぞれで、超伝導材料の特徴の一つである磁化率の低下が確認された。

磁化率の外部磁場に対する依存性を測定した結果を拡張 Bean の式に代入して得られた J_c を磁場に対してプロットしたものを Fig.4 に示した。この図より、母相に In を添加した複合材料の方が In を添加していない複合材料よりも常に高い J_c を示しており、In の効果が表れたと考えられた。

参考文献

- 1) K.Matsuda, S.Ikeno, T.Saiki, K.Nishimura, K.Mori, M.Narita : J.Japan Inst. Metals, Vol.69 (2005) pp.977 - 982
- 2) M.Morobayashi, K.Matsuda, K.Nishimura, K.Mori, S.Ikeno : Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol.111 (2006) pp.237 - 238
- 3) K.Tachikawa, Y. Yamada, O. Suzuki, M. Enomoto, M. Aodai: Physica C 382 (2002) 108 - 112

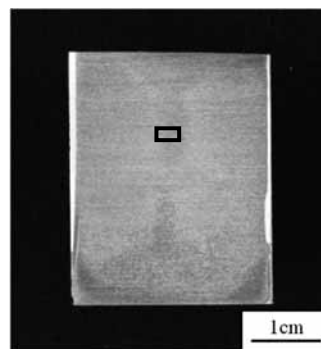


Fig.1 Cross section image of MgB₂/Al-0.1wt.%In composite.

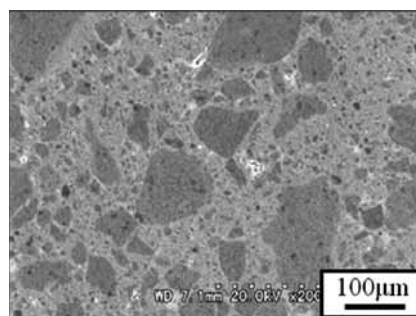


Fig.2 Enlarged SEM image of MgB₂/Al-0.1wt.%In composite.

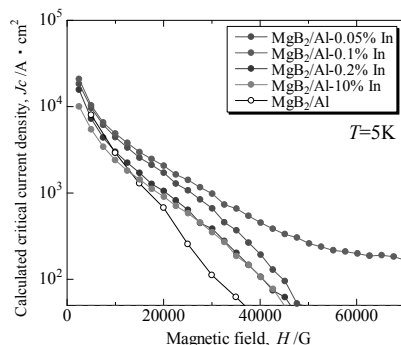


Fig.3 Critical current density of the composites materials.

大型 Gd-Ba-Cu-O 系バルク材の 10T 級捕捉磁場特性

10 T Class Trapped Field Properties of a Large Gd-Ba-Cu-O Bulk Superconductor

手嶋 英一、森田 充(新日鉄)、荒屋敷貴大、古田大樹、内藤智之、藤代博之(岩手大)

TESHIMA Hidekazu, MORITA Mitsuru (Nippon Steel Corp.),

ARAYASHIKI Takahiro, FURUTA Taiki, NAITO Tomoyuki, FUJISHIRO Hiroyuki (Iwate Univ.)

E-mail: teshima.hidekazu@nsc.co.jp

1. はじめに

RE系(REはYまたは希土類元素)高温超電導バルク材は、磁場中でのピン止め力が強いため、MDDSやNMR、船舶用モータ、風力発電機などの強磁場発生源としての応用が期待されている。これらのバルク磁石応用における磁場強度は、数~10T級となる。10T級の強磁場捕捉については、比較的小型試料では実績があるが[1]、直径30mm以上の大型試料では報告例は少ない。試料サイズが大きくなると、捕捉される総磁束量が大きくなり、試料に作用する電磁力も大きくなるため、大型試料での10T級着磁においては、試料が破壊することも懸念される。そこで、本研究では、金属リング補強した直径46mmの大型Gd-Ba-Cu-O系高温超電導バルク材を用いて、10T級の捕捉磁場特性を評価した。

2. 実験

本研究で用いたGd系バルク材は、高配向した超電導相(123相)中に1 μ m程度の非超電導相(211相)が微細分散した試料で、Gd123相:Gd211相=1:3の組成比に0.5wt%のPtと10wt%のAgを添加した原料粉を用い、改良型QMG法[2]により作製した。試料サイズは直径46mm、厚さ15mmで、肉厚5mmのステンレス製金属リングと樹脂接着し補強した。試料表面中央にホール素子(FWBell製BHT921)を、その隣に温度計を貼付した。試料は冷凍機冷却式の容器にセットされ、着磁は最大印加磁場10Tの超電導マグネットを用いた。着磁条件は、磁場中冷却にて行った。すなわち、100Kにて所定の磁場を印加した後、75K、70K、66K、60K、42Kの各温度に下げ、その後減磁した。JIS規格(H73132007)に基づき、減磁後15分以上経過してから、捕捉磁場を測定した。なお、試料表面に貼付したホール素子に加えて、冷却容器表面にて捕捉磁場分布も測定した。試料表面と冷却容器表面の距離は約6mmであった。

3. 結果

Fig.1は、42Kでの冷却容器表面での捕捉磁場分布である。捕捉磁場分布がきれいな円錐形状であることから、印加磁場10Tでの着磁条件においても試料が破損しなかったことが分かる。さらに、試料表面から6mm離れているにもかかわらず、ピーク磁場強度は4.58Tと高い値を有していた。Fig.2は、バルク材表面での捕捉磁場の温度依存性を示す。42Kでのバルク材表面での捕捉磁場は9.08Tであったが、Fig.2から、この値はフル着磁したものではないことが推察される。75K~60K間での変化率0.32T/Kであった。より

低温では、高温領域で有効な211相のピン止め力に加え、他のピン止め力も上乘せられるため、変化率が大きくなることが予想されるが、直線的な外挿でも、直径46mmのGd系バルク材には、42Kで13T級の強磁場を捕捉できる能力があることが期待できる。

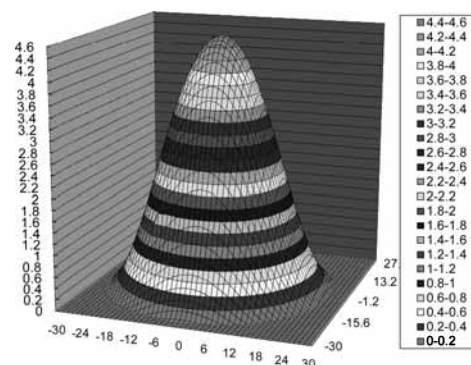


Fig.1 Trapped field distribution on the cryostat surface at 42K.

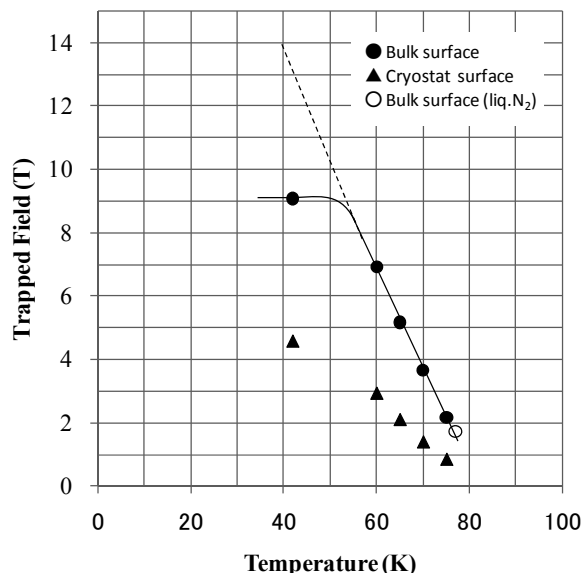


Fig.2 Temperature dependence of the trapped field for a Gd-Ba-Cu-O bulk superconductor 46mm in diameter.

参考文献

1. M.Tomita et al., Nature Vol.421, 517-520
2. M.Morita et al., Physica C 253-240 (1994) 209-212

液体バインダーの YBCO バルク超伝導体の超伝導特性に対する影響

Effect of superconductive property in Y-Ba-Cu-O bulk superconductor through liquid binder enrichment

池田 洋二, 馬越 純人, 菊池 暢, 関 宏範, 腰塚 直己, 村上雅人 (芝浦工大); WONGSATANAWARID Atikorn (モンクット工科大)

IKEDA Yoji, UMAKOSHI Sumito, KIKUCHI Toru, SEKI Hironori, KOSHIZUKA Naoki, MURAKAMI Masato (Shibaura Institute of Technology); WONGSATANAWARID Atikorn (King Mongkut's University of Technology Thonburi)

E-mail: m210006@shibaura-it.ac.jp

1. はじめに

ポリビニルアルコール (PVA) などの有機バインダー添加はバルク超伝導前駆体の機械特性向上に有効である。しかし、脱バインダー処理後に炭化水素が残留すると、超伝導特性が劣化する可能性がある。そこで、本研究では $\phi 20\text{mm} \times 10\text{mm}$ の Y-Ba-Cu-O バルク超伝導体を用いて、単一ドメイン溶融成長プロセスにおける PVA 液体バインダー付加による超伝導特性への影響を検証した。

2. 実験方法

原料粉末として $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (Y123) と Y_2BaCuO_5 (Y211) を 10 : 4 のモル比で秤量し、 CeO_2 を 1wt%、バインダー (水 200 ml、ポリビニルアルコール 10 g、グリセリン 10 ml、エタノール 10 ml を混合) を 0~10wt% 添加した。これら混合粉を、内径 20 mm の治具に入れ、一軸プレスにより厚さ 12 mm の前駆体に成型した。前駆体の機械的特性を評価するために圧縮試験を行った。その後、前駆体に、溶融成長 (ホットシーディング法)¹⁾ および酸素アニール処理を施し、単一ドメインバルク超伝導体を作製した。捕捉磁場特性評価は、表面磁束密度 0.45T の Fe-Nd-B 磁石を用いて液体窒素 (77K) 中で磁場中冷却を行い、ホール素子を用いて二次元走査測定する手法で行った。また、バインダー添加がバルク超伝導体の微細組織に及ぼす影響を調べるため SEM 観察を行った。

3. 実験結果および考察

Fig.1 にバインダー添加量と前駆体の圧縮強度との関係を示す。バインダー添加により前駆体の圧縮強度が向上していることが分かる。これは、バインダーが前駆体の粒子間の隙間に入り粒子をより強固に結合させているためと考えられる。ただし、バインダーを 10% 添加した場合、8% 添加材より圧縮強度は低下している。これは、バインダー添加量が多いと、過剰な液相部分が増加し、それによる強度低下と考えられる。

Fig.2 にバインダー添加量 2% で作製した単一ドメインバルクの SEM 観察結果を示す。バインダーを添加しても Y211 の大きさおよび分散状態に大きな変化がないことが分かった。

また、バインダー添加なしのバルク超伝導体と比べクラックの量少なくなっていることが分かった。

これはバルク体作製時に前駆体に導入されるマイクロクラックがバインダー添加によって、その発生が抑制されたためと考えられる。

Fig.3 にバインダー添加量 2% の単一ドメインバルク Y-Ba-Cu-O 超伝導体の捕捉磁場分布を示す。バインダーを添加した場合でも、単一ピークが得られており、バインダー添加が結晶成長に悪影響を与えていないことが分かる。

4. まとめ

バインダーを添加すると、バルク超伝導体前駆体の機械特性を向上できることが確認できた。また、バインダー添加材においても、単一ドメイン成長が可能であることが確認できた。

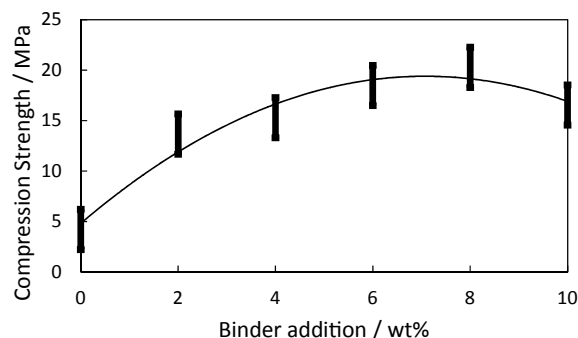


Fig.1 Compression strength of the precursors as a function of the binder addition.

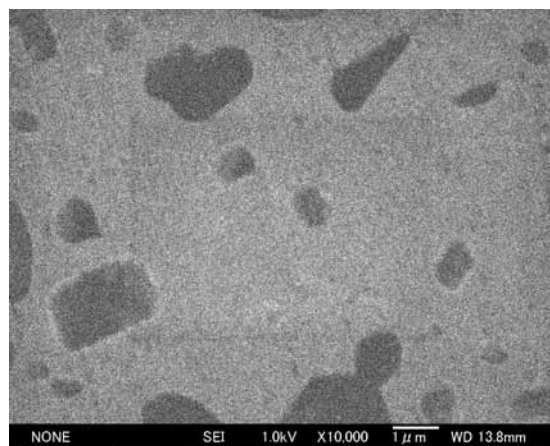


Fig.2 SEM of the polished surfaces of Y-Ba-Cu-O bulk superconductor with 2wt% binder addition.

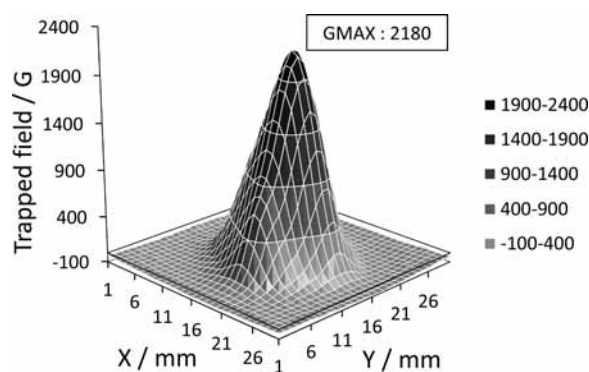


Fig.3 Magnetic field distribution trapped by a bulk Y-Ba-Cu-O added with 2wt% binder addition.

参考文献

- 1) 成木 紳也, 坂井 直道, 村上 雅人 : 低温工学, vol.37 No.11, (2002), p591

Top-seeded infiltration-growth (TIG) 法により作製した YBCO 超伝導バルク体の作製および特性評価 Characterization of Y-Ba-Cu-O bulk superconductors prepared by top-seeded infiltration growth

馬越 純人, 池田 洋二, 菊池 暢, 村上 雅人 (芝浦工業大学); 金 讚中 (韓国原子力研究所)
UMAKOSHI Sumito, IKEDA Yoji, KIKUCHI Toru, MURAKAMI Masato (Shibaura Institute of Technology);
Kim Chan.Joong (Korea Atomic Energy Research Institute)
E-mail: m210009@shibaura-it.ac.jp

1. はじめに

超伝導バルク体の作製法の一つに Top-seeded infiltration-growth (TIG)法がある。TIG 法とは高温状態において、毛細管現象により液相を固相に染み込ませて反応させる手法である。この手法では $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (Y123)相内に Y_2BaCuO_5 (Y211)相粒子を均一に分散させることが可能であり、より均一な微細組織を得ることができる。また、液相が固相内に浸透することにより、クラックの導入や焼縮の発生を軽減することもできる。そこで、本研究では TIG 法により Y-Ba-Cu-O 超伝導バルク体を作製し、その組織と超伝導特性について調べることを目的とした。

2. 実験方法

TIG 法による Y-Ba-Cu-O 超伝導バルク体の作製は以下に示す手順で行った。仮焼した Y211 粉を内径 20mm φ の治具により、一軸等方プレス成型したのち、1200K で焼結することにより、前駆体を作製した。また、仮焼した $\text{Ba}_3\text{Cu}_5\text{O}_8$ も同様に一軸等方プレス成型することで前駆体を作製した。Y211 粉は市販の Y_2O_3 、 BaO_2 、 CuO 粉を混合攪拌し、1173K で仮焼したものを用いた。また、 $\text{Ba}_3\text{Cu}_5\text{O}_8$ は市販の BaO_2 、 CuO 粉を混合攪拌し、1073K で仮焼したものを用いた。支持部材として、市販の Yb_2O_3 粉を一軸等方プレスしたものを敷き、さらにその下に MgO 単結晶基板を置いた。種結晶には Sm123 単結晶を使用した。作製した前駆体および支持部材の配置方法を Fig.1 に模式的に示す。最後に熱処理及び、酸素アニール処理を施し、超伝導バルク体を作製した。

超伝導バルク体の評価方法として、捕捉磁場測定、SEM による表面組織観察を行った。

捕捉磁場測定は表面磁場が 0.5T の Fe-Nd-B 磁石を用い、液体窒素を用いて、磁場中冷却にて着磁し、その後、ホール素子を二次元的に試料表面を走査して測定した。

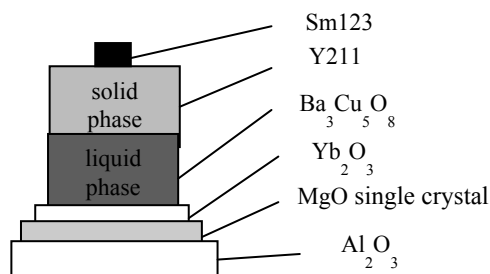


Fig. 1 Configuration of the precursor layers for the TIG process employed in the present study.

3. 実験結果および考察

Fig.2にTIG法により作製したY-Ba-Cu-O超伝導バルク体の外観写真を示す。熔融成長後の試料表面において、結晶が正方状に広がることで生成するファセットラインが、試料端まで伸びており、結晶成長が完了したことが分か

る。また、側面においても、明瞭なファセットラインが生成して、試料下部まで伸びていることから、約20 mm φ の単一ドメイン結晶がバルク体全体にわたって成長したものと考えられる。

Fig.3にTIG法により作製したY-Ba-Cu-O超伝導バルク体の液体窒素温度 (77K) における捕捉磁場分布の測定結果を示す。最大捕捉磁場は1290Gであった。Fig.3から捕捉磁場は試料全体に分布しているものの、単一ピークとはなっていない。この原因として、Sm123の種が固相に拡散して付近の T_c がわずかに低下したことが考えられる。

以上の実験から、TIG法により単一ドメインのバルク超伝導体の合成が可能になったことが明らかになった。ただし、超伝導特性に関しては、さらなる成長条件の最適化が必要である。

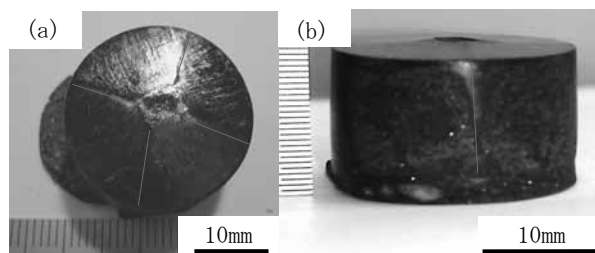


Fig.2 Photos of TIG-processed Y-Ba-Cu-O: (a) top surface; and (b) side surface

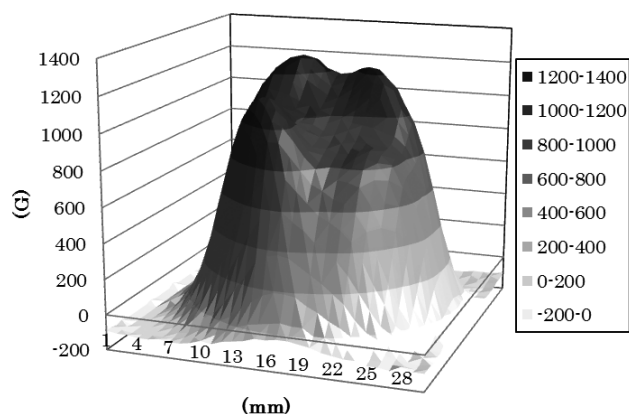


Fig. 3 Trapped field distribution of bulk Y-Ba-Cu-O grown by the TIG process.

参考文献

- [1] Y.A.Lee, et al, J. Mater. Res. 13 (1998) 583.
- [2] S.Nariki, et al, Physica C 412-414 (2004) 557
- [3] S.Nariki, et al, Supercond. Sic. Technol. 19 (2006) S478

NEG123 超伝導バルク体の作製条件

Processing conditions of (Nd, Eu, Gd)-Ba-Cu-O bulk superconductors

菊池 暢, 馬越純人, 池田洋二, 高野 翔大, 関宏範, 腰塚直己, 村上雅人 (芝浦工業大学)

KIKUCHI Toru, UMAKOSHISumito, IKEDA Youji, TAKANO Shota, SEKI Hironori, KOSHIZUKA Naoki, MURAKAMI Masato
(Shibaura Institute of Technology)

E-mail: m210017@shibaura-it.ac.jp

1. 緒言

希土類元素 (RE: Nd, Sm, Eu, Gd) などの RE-Ba-Cu-O 系超伝導体を低酸素分圧下で溶融成長させる OCMG 法により作製すると、臨界温度 T_c が Y123 よりも高く、不可逆磁場も大きく改善されることが明らかになっている[1]。その中でも特に (Nd, Eu, Gd)Ba₂Cu₃O_y (NEG-123) 超伝導バルク体は、他の RE-123 系超伝導体に比べて J_c と不可逆磁界 B_i が大きく、さらに中磁場領域において J_c がピークを示すピーク効果が知られている[2]。磁気分離装置、ドラッグデリバリーシステム、フライホイールエネルギー貯蔵装置、超伝導モータなど幅広い分野で応用が期待されている。しかし、OCMG 法においては、雰囲気制御にコストがかかるうえ、ホットシーディングにも工夫を要する。そこで、炉の上部から Ar ガスを流し、直接前駆体に吹きつける法で容易にの可能性を考えた。

しかし、Ar ガス注入による温度分布については、明らかとはなっていない。そこで、本研究では、炉内の温度変化についてサーモグラフィーを用いて測定し、一般的な溶融成長法である TSMG 法の焼結との比較を行った。

2. 実験方法

最初に (Nd_{0.33}-Eu_{0.33}-Gd_{0.33}) (NEG-123) Ba₂Cu₃O_y 超伝導粉末を作製するために Nd₂O₃, Eu₂O₃, Gd₂O₃, BaO₂, CuO を混合させ、最高温度 860 °C で 3 回仮焼結を行った。NEG-123 と NEG-211 を混合した NEG 超伝導バルク体を作製した。商業用の Nd-422, Eu-211, Gd-211 を混合し、(Nd, Eu, Gd)₂BaCuO₅ (NEG-211) 超伝導粉末を作製した。NEG-123 と NEG-211 をモル比 10:5 で混合し、前駆体を作製した。種結晶としては Nd-123 を用いた。

前駆体を炉に入れて Fig.1 に示す方法で Ar ガスを流入した状態で、設定温度を 1200 °C から 900 °C まで、変化させながら、炉内の温度はサーモグラフィーを用いて測定した。

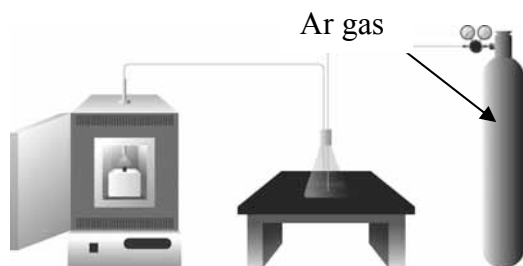


Fig.1 Schematic diagram of the present experiment.

3. 実験結果及び考察

Fig.2 に炉内において高さ (Y 軸) を種結晶と前駆体が面している点を固定し、横軸 (X 軸) 方向の炉内の温度を測定したグラフを示す。Fig.2 から分かるように、前駆体が設置している箇所は周りの温度に比べて低くなっている。さらに、Ar ガス流入を行った場合は、通常の空気中での

設定に比べ炉内の温度が大きく低下していることが分かる。

Fig.3 に前駆体周辺の温度を測定し、平均化したグラフを示す。こちらも同様に Ar ガスを流入した場合には、炉内の温度が低下していることが分かる。本実験で流入させている Ar ガスは常温の気体であるため炉内の温度が設定温度よりも低下したものと考えられる。Ar ガス流入により平均して 30~40 °C ほど低下して Ar ガスを流入すると、炉内の温度は通常の焼結よりも低下しているため、本方法で溶融成長を行う場合には、温度設定の際には、以上の温度差を考慮する必要がある。また超伝導バルク体を作製する際には、Ar ガス量の変化が、バルク体の結晶成長および超伝導特性にどのような影響を及ぼすかの検討も必要となる。

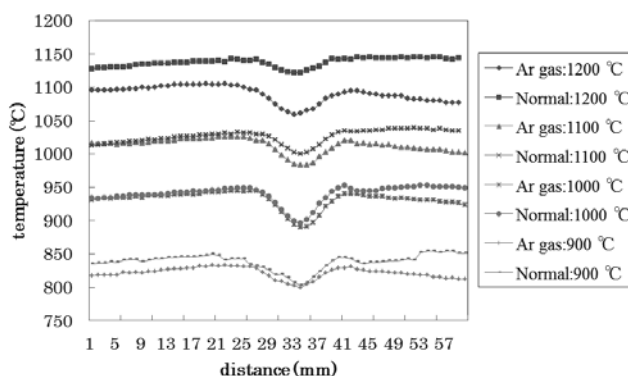


Fig.2 Temperature profile with and without Ar gas flow.

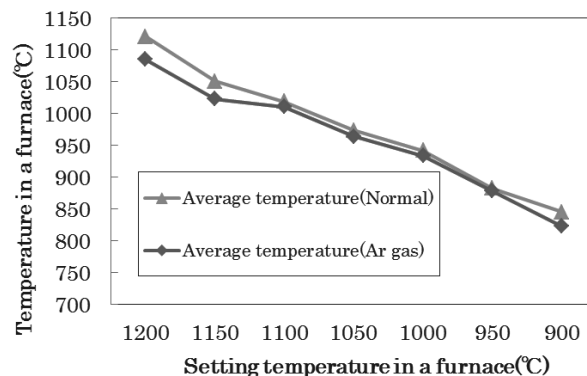


Fig.3 Relationship between the setting temperature and furnace temperature with and without Ar gas flow.

参考文献

1. M. Murakami: Jpn. J. Appl. Phys. 33 (1994) p.715
2. M. Muralidhar, et al.: Appl. Phys. Lett. 79 (2001) p.3108

DyBCO 系超伝導バルクの作製と置換効果 II

---置換量の増加による J_c への効果---

Crystal growth and substitution effect of DyBCO bulk superconductor II

--- Effect of increasing contents of substituted ion on $J_c(B, T)$ properties ---

菊池 康晃、内藤 智之、藤代 博之(岩手大)

KIKUCHI Yasuaki, NAITO Tomoyuki, FUJISHIRO Hiroyuki (Iwate Univ.)

E-mail: y.k.changemysself@hotmail.co.jp

1. はじめに

REBCO 超伝導体バルク(RE:希土類元素)の特性向上の手段の一つとして、元素置換によるピン止め中心の導入がある。Cu サイトや RE サイトへの微量元素置換を行うことで、 $J_c(B)$ 特性が向上することが報告されている [1], [2]。我々は、YBCO に比べて熱伝導率が低く電流リードなどへの応用に適している DyBCO バルクに着目している。前回の学会では、Dy サイトに La, Pr, Gd を最大 1% 置換したバルクを作製し、50 K において $J_c(B)$ 特性が全ての組成で改善されることを報告した [3]。今回、置換量を 2% ($x = 0.02$) まで増やし、 $J_c(B)$ 特性と置換量の関係を検討したので報告する。

2. 実験方法

$(Dy_{1-x}RE_x)Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ (RE=La, Pr, および Gd) [$x=0\sim 0.020$] 焼結体は Dy_2O_3 、 $BaCO_3$ 、 CuO および、 La_2O_3 (又は Pr_6O_{11} , Gd_2O_3)を秤量・混合し 900°C で 24 h の仮焼、940°C で 24 h の本焼を行い作製した。 Dy_2BaCuO_5 焼結体は 800°C で 24 h の仮焼を 6 回行った後、820°C で本焼きを行い作製した。 $(Dy_{1-x}RE_x)Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ と Dy_2BaCuO_5 をモル比 10:3 で秤量し、これに 0.5 wt% の CeO_2 、10 wt% の Ag_2O を加えた混合粉を直径 20 mm、厚さ 10 mm のペレット状に加圧・成形し前駆体とした。バルク試料は種結晶に劈開した NdBCO バルクを使用し、cold seeding による熔融法で作製した。得られたバルクを 400 °C で 2 週間酸素アニールした。磁化測定は SQUID 磁束計を用いて行った。測定試料は種下 1、3 mm の位置から切り出した。77 K、50 K での磁化の磁場依存性から拡張型 Bean モデルを用いて、臨界電流密度 J_c の磁場依存性を見積もった。

3. 結果と考察

Fig.1(a)–1(c) に各 $(Dy_{1-x}RE_x)BCO$ バルクの各置換量における種下 1mm、50 K での $J_c(B)$ 特性を示す。それぞれ、La 置換では $x = 0.003$ 、Gd 置換では $x = 0.015$ 置換したバルクの $J_c(B)$ 特性が改善した。Pr 置換においては、 $J_c(B)$ 特性が向上する置換量が存在しなかった。また、La、Gd においても、それ以外の置換量においては $J_c(B)$ 特性は低下した。2.0%置換($x = 0.02$)では、 $J_c(B)$ 特性の低下が特に大きく、これは過剰置換が原因だと思われる。また、77 K については、目立った $J_c(B)$ 特性の向上は見られなかった。現在、再現性を確認するため、新たなバルク成長を行っており、講演ではそ

れらの結果も併せて報告する予定である。

参考文献

- [1] Y. X. Zhou *et al.*, Supercond. Sci. Technol. **19** (2006) S556
 [2] Y. Ishii *et al.*, Physica C **460–462** (2007) 1345
 [3] Y. Kikuchi *et al.*, Abstracts of CSJ Conference, Vol. **82** (2010) [2P-p16]

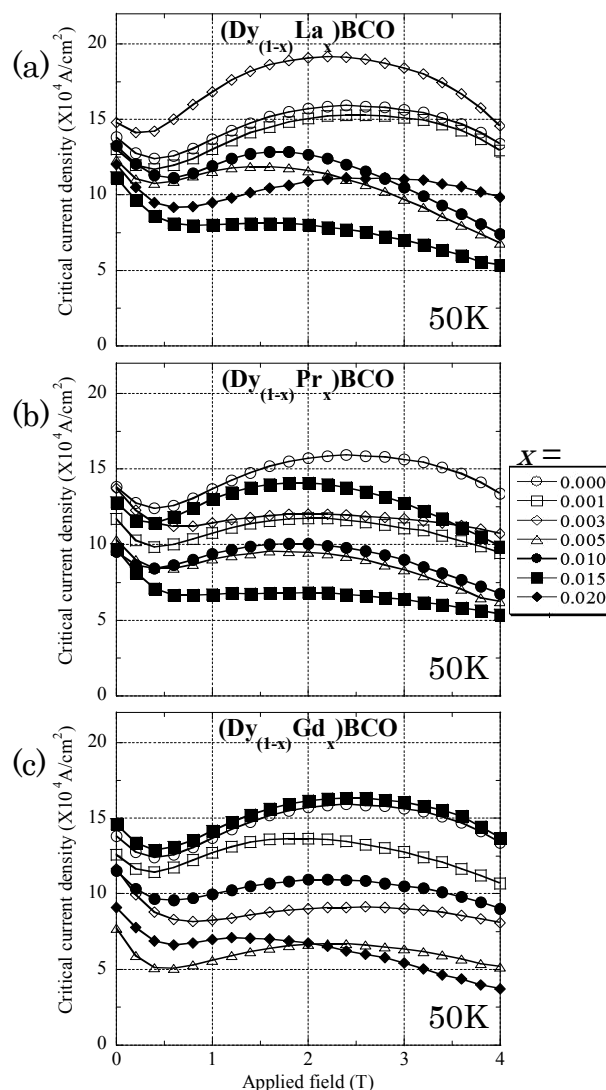


Fig.1: Magnetic field dependence of J_c at 50 K for $(Dy_{1-x}RE_x)BCO$ bulk [RE=La, Pr, Gd]. Samples are cut from the position 1 mm below the seed.

リング形状樹脂含浸バルク体の磁場特性

Magnetic field of resin-impregnated bulk superconductor annuli

富田 優, 福本 祐介, 鈴木 賢次, 石原 篤, ミリアラ ムラリダ(鉄道総研)
 TOMITA Masaru, FUKUMOTO Yusuke, SUZUKI Kenji, ISHIHARA Atsushi, Miryala Muralidhar (RTRI)
 E-mail: tomita@rtri.or.jp

1. はじめに

鉄道総研では、バルク等の高温超電導材を積層して使用する NMR システムの応用についての検討を進めてきた¹⁾。一方で大型の超電導バルク材を使用し、幅広い分野で活用できる簡易型超電導マグネットの実現を目指した研究を進めている。超電導マグネットのユーザーはできる限り、サンプル空間の大容積化を望んでいるが、穴の径が大きくなるに従い加工面積も増えてしまうため、表面の加工損傷箇所も多くなる。そのため、樹脂含浸により磁場の安定化を図った²⁾。

これまで、ボア径 40mm 以上のリング形状に加工したバルク体を 4 個積層することにより、2 テスラ以上の発生磁場を実証した³⁾。今回、積層数による中心磁場の変化を測定するとともに、バルクマグネットにて ϕ 30mm のバルクの着磁を行った。

2. 測定方法

直径 80mm、内径 45mm のリング状に加工し、樹脂含浸による補強を施した超電導バルク材(Gd-123)について、積層数を変えて超電導マグネットにより着磁を行った。それぞれの積層数について、中心の磁場分布および軸方向の磁場分布を測定した。

さらに簡易型超電導マグネットとしての機能を検討するために、 ϕ 30mm のバルクを用いて、リング形状バルク体を 4 個積層したバルクマグネットにて着磁した場合と、超電導マグネットでは着磁した場合の磁場分布特性について比較した。

3. 測定結果

リング形状樹脂含浸バルク体の積層数による中心磁場の変化を図1に示す。積層数が増えるにつれ、中心磁場の上昇率は低くなるが、10個まで積層させることにより2.59Tまで中心磁場が向上することがわかった。

超電導マグネットおよびバルクマグネットでは着磁したバルク体の磁場分布測定結果を図3に示す。超電導マグネットでは着磁した場合と比較し、本マグネットでも同様に着磁できることを確認した。

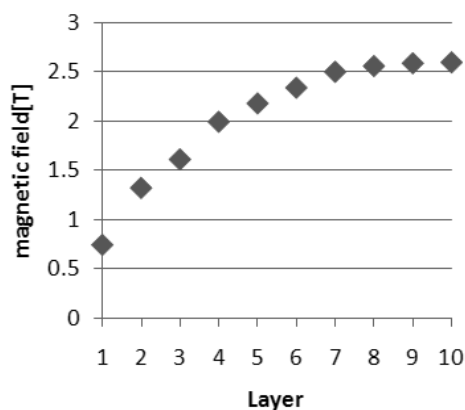


Fig.1 The trapped field at the center of the ring stack vs. the number of the ring magnet

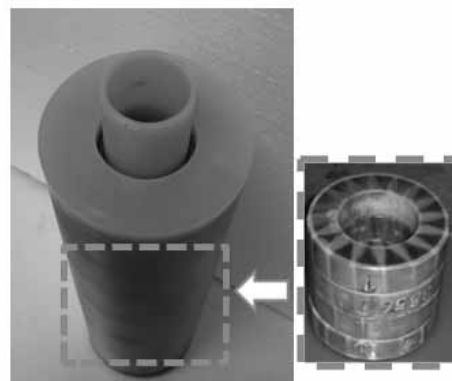


Fig.2 Gd-123 annular superconducting magnet

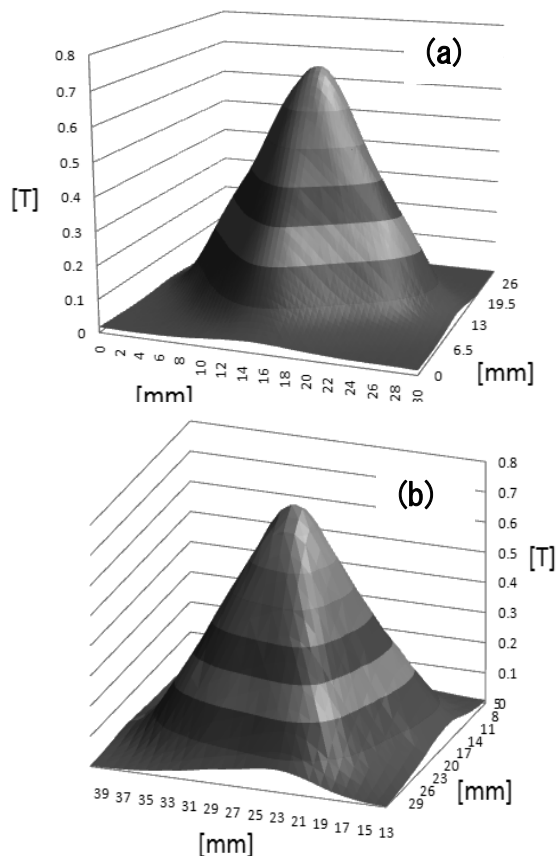


Fig.3 Magnetic field distribution
 (a) Using superconducting magnet
 (b) Using Gd-123 annular superconducting magnet

参考文献

1. Y. Iwasa, S. Hahn, M. Tomita, H. Lee and J. Bascunan: IEEE Trans. Appl. Supercond.15 2352-2355 (2005)
2. M. Tomita, M. Murakami: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 60 (1999) p.216
3. M. Tomita, Y. Fukumoto, K. Suzuki, A. Ishihara: Abstracts of CSJ Conference, Vol.81 (2009) p.95

デモンストレーション用超伝導サスペンションカーの製作

Making demonstration car with superconducting suspension

二村 宗男, 須藤 誠一 (秋県大)

FUTAMURA Muneo, SUDO Seiichi (Akita Pref. Univ.);

E-mail: futamura@akita-pu.ac.jp

1. 諸言

超伝導デモンストレーションの一つとして、磁石レール上を浮上走行する MAGLEV (ジェットコースター) は大きな興味を引きつけ、実験教室などで人気が高い。しかしながら、最近では超伝導ジェットコースターを見る小学生の中には「〇〇で見た!」という声も聞かれるようになった。また、製作には多数の永久磁石を敷き詰めたレールが必要であり、磁石費用、運搬設置の不便さが大きな欠点となっている。そこで我々は、新たなデモンストレーションモデルとして超伝導浮上を用いたモデルカーを製作した。

2. 超伝導サスペンションカーの製作

超伝導サスペンションカーのイメージを Fig.1 に示す。超伝導体を内蔵した車体が、車輪のネオジウム磁石に支えられて浮上している。ピン止め磁束によって、[車体支持]と[回転軸受]の2つの機能を非接触で行う。したがって、車体支持のための磁気力の強さが重要である。しかし車輪の軸受けでは磁石の極方向が超伝導体表面に対して平行になるので十分な磁気力を得ることが困難である。そこで車輪磁石の構造の検討をおこなった。

Fig.2 に、5 種類の磁石モジュールにおける磁気力の比較を示す。磁石モジュールから 7mm の位置に超伝導体 (QMG-DyBaCuO 直径 32mm 厚さ 5mm) をおいて磁場中冷却し、磁石との距離を引き離すときの力を吸引力を負として示している。直径 15mm 厚さ 10mm の Nd-Fe-B 磁石 1 個 (Fig.2 ●) が およそ 0.3N のピーク磁気力に対し、同じ向きで磁石 2 個 (□) に増やした磁気力の向上はわずかであった。磁石 3 個 (△) に増やしたときの磁気力は、2 個のときに比べて弱まってしまった。これは磁石モジュールの長さが超伝導体直径とほぼ同じになってしまい、超伝導体に侵入しない磁束が増えたことによる。磁石を同方向に組み合わせた場合には、磁極面はモジュール両端にのみ存在することになるのでピン止め磁束線の数は磁石モジュールの長さに影響を受ける。

そこで、ヨーク (S45C, 直径 15mm, 厚さ 3mm) を介して磁石を対向に組み合わせて磁石モジュールを製作した。磁石 2 個の対向モジュール (■) ではピーク磁気力が 0.8N を超えた。磁石 3 個の対向 (▲) ではさらに増加し、およそ 1.1N であった。この対向磁石モジュールは、Nd-Fe-B 磁石の強力な反発力のために非常に不安定である。製作は、内径 16mm のアクリルパイプ内にエポキシ樹脂を浸透したグラスクロスで包むようにして磁石を押し込んでいき、最後にエポキシ樹脂を流し込んで固定した。

磁石 3 個を組み合わせた対向磁石モジュールを 2 組と、超伝導体 2 個を内蔵した車体 (LN2 含め 84.5g) とで試作機を製作した。車体と車輪の間隔 4mm で磁場中冷却した後、3.2mm の間隔で車体の浮上を確認し、緩やかな傾斜を走行することに成功した (Fig.3)。

3. まとめ

従来に無い超伝導デモンストレーションモデルとして、超伝導サスペンションカーを考案した。車輪の磁石配置を検討することで車体支持に十分な磁気力を得ることができ、試作機の走行に成功した。本デモ機の製作過程は学生教育に最

適であり、また 完成品は超伝導デモの新たなモデルとして期待できる。

参考文献

1. M. Futamura, et al., Extended Abstracts, The 70th Autumn meeting of The JSAP, No.1(2009), p.422

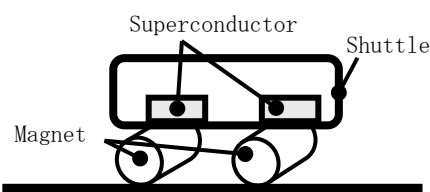


Fig.1 Schematic of superconducting suspension car.

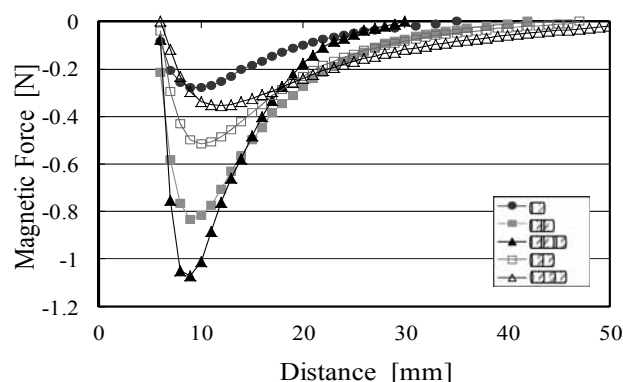


Fig.2 Magnetic force for various magnet modules.

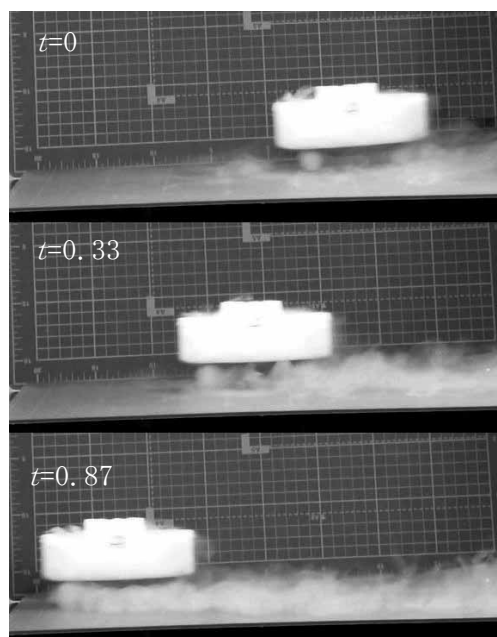


Fig.3 Test run of the prototype car.

多層コイルに巻いた酸化物超伝導並列導体の電流分流特性の検討 Study on the current sharing properties of oxide superconducting parallel conductors wound into multilayer coil

宇都 浩史, 高山 洗, 富岡 章, 岩熊 成卓(九州大学);

林 秀美, 岡元 洋(九州電力);

大熊 武, 五所 嘉宏, 和泉 輝郎, 塩原 融 (ISTEC);

UTO Hiroshi, TAKAYAMA Kou, TOMIOKA Akira, IWAKUMA Masataka (Kyushu-Univ.);

HAYASHI Hidemi, OKAMOTO Hiroshi (Kyushu Electric Power CO.);

OHKUMA Takeshi, GOSHO Yoshihiro, IZUMI Teruo, SHIOHARA Yuh (ISTEC)

E-mail: uto@sc.kyushu-u.ac.jp

1 はじめに

酸化物超伝導線材を電力機器の巻線や大型超伝導マグネットに適用するためには大電流容量化が必要となる。現在の酸化物超伝導線材は、結晶の配向性を向上させるためにテープ状に加工されているため、大電流容量化するためにはテープ状の素線を並列に重ね合わせて並列導体を構成する必要がある。しかし、単に積層しただけでは自己磁界効果によりそれぞれの素線に流れる電流が偏ってしまうため、適切な位置で素線の位置を入れ替える転位を施し、電流分流比を均一にしなければならない。

そこで本研究ではこれまでの研究により提案した電流分流比を最も均一にする転位方法について、巻き乱れや形状変化等の影響についての考察を行い、機器応用への適用性の検討を行ったので報告する。

2 転位方法

これまでの研究で、各層間において転位を行う層間転位を提案し、検討してきたが、設計上の寸法などの制約がある場合は最適転位に必要な層数から増減せざるを得ず、その場合の電流分流比は均等にならない。その対策として最外層において層内転位を行うなどの方法をとってきたが、これには決まった法則性がなく、また層数によっては補正方法を見つけることが困難であった。そこで、層間に加えて層内でも転位を施すことにより、層数に依らず電流分流比を均一にする最適転位方法についての検討を行った。これまでは素線数 3 本の場合を想定して解析を行っていたが、今回は素線数を 4 本、5 本、6 本と増やした際も電流分流比が均一になるかの検討を行った。Fig.1 に素線数 4 本の場合の電流分流比の層数依存性を示す。

3 コイル形状変化及び巻き乱れの及ぼす影響

最適転位方法を実用化するためにはコイルの大型化を図る必要がある。そこでコイルの大型化への適用のために、コイル形状変化による電流分流特性への影響について検討を行った。ターン数を一定にしてコイル内径を変化させた場合と、コイル内径を一定にしてターン数を変化させた場合について検討を行った。また、これまででは、コイルがきれいに巻かれている状態での検討を行ってきたが、実際にコイルを作成する際には巻乱れが生じうる。そこで巻乱れが起きた際に電流分流比にどれだけの影響が出るかの検討を行った。今回は素線数 3 本のソレノイドコイルを想定して解析を行った。Fig.2 に軸方向に 1 カ所だけ巻き乱れが起きた際の電流分流比の内径依存性を示す。

4 結論

素線数を 4 本、5 本、6 本と増やしても、またコイル形状を変化させても電流分流比は均一に保つことが出来た。また軸方向、径方向の巻乱れが起きた際も電流分流比の乱れを小さく抑えられた。

以上の事から、今回検討を行った転位方法は有効である事が確認できた。

5 謝辞

本研究は、イットリウム系超伝導電力機器技術開発の一環として、ISTECを通じてNEDOからの委託を受けて実施したものである。

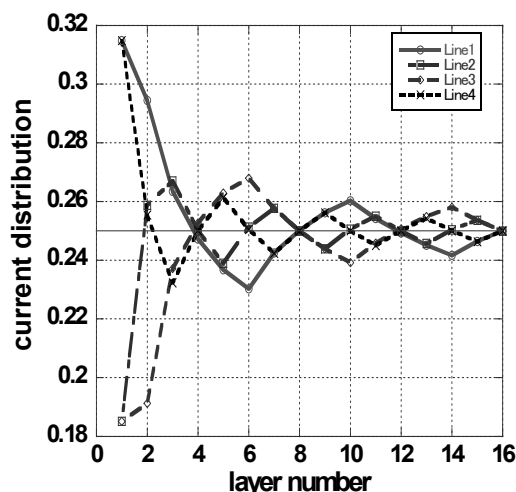


Fig.1 The current distribution in a 4-strands parallel conductor

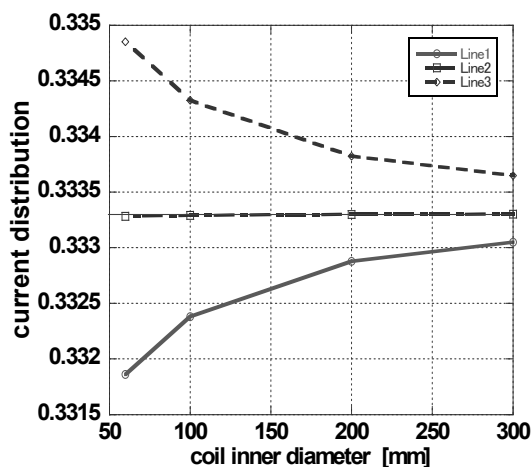


Fig.2 The current distribution in a 3-strands parallel conductor with a winding pitch disorder

超伝導二本転位並列導体の巻き乱れの影響による 付加的交流損失に関する検討

Examination concerning an additional AC loss by influence of rolling disorder of transposed two parallel SC conductors

森脇 大輔, 洪田 寛, 岩熊 成卓, 船木 和夫(九州大学); 林 秀美, 岡元 洋(九州電力); 大熊 武, 五所 嘉宏, 和泉 輝郎, 塩原 融(ISTEC); MORIWAKI Daisuke, SHIBUTA Hiroshi, IWAKUMA Masataka, FUNAKI Kazuo(Kyushu-Univ.); HAYASHI Hidemi, OKAMOTO Hiroshi(Kyushu Electric Power Co.); OHKUMA Takeshi, GOSHO Yoshihiro, IZUMI Teruo, SHIOHARA Yuh(ISTEC);
E-mail: moriwaki@sc.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

我々は大電流容量酸化超伝導体の構成法として、素線を用いて巻線を行い、その途中で転位を施す方法を提案している。本研究はこの転位並列導体に不均一な外部磁界を印加した場合に発生する付加的交流損失を定量的に明らかにすることを目的としている。

今回は、巻き数の半分で転位し、転位位置を基準として両側で巻き乱れが発生した場合の二本転位並列導体の付加的交流損失について解析を行った。

2. 並列導体の交流損失

図1は二本転位並列導体をNターンの1層コイルに巻き、全体の巻き数の半分の位置で転位を行い、さらにコイルの途中で巻き乱れが起こり、これより外側のターンがすべて Δl ずれた場合のコイル鳥瞰図である。図2は想定した導体に印加されるn次曲線の磁界分布のグラフである。コイルの真ん中の位置での磁界振幅を B_m とした。このように巻き乱れのずれがあると並列導体に磁束が鎖交し、それを打ち消すように遮蔽電流が発生する。その遮蔽電流が素線の臨界電流値に達しない場合の、非飽和条件下の付加的交流損失の式は次式で表される。

$$W = \frac{1}{K} \frac{\pi \omega \tau}{1 + (\omega \tau)^2} \frac{1}{2N^2 \mu_0 d_s w} \left(\frac{\Phi_{B(x)}}{L} \right)^2$$

一方、遮蔽電流が臨界電流値に達する場合である飽和条件下における交流損失は次式で表される。

$$W = \frac{2d_s I_c}{N^2 u w} \left(\frac{\Phi_{B(x)}}{d_s L} - \mu_0 \frac{K}{u} I_c \right)$$

3. 考察

図3は、巻き乱れが転位位置から左側で25巻き目、右側で転位位置から50巻き目で発生し、そのずれ幅が $\Delta l/w=5$ の場合の付加的交流損失の磁界振幅 B_m 依存性である。さらに、右側の巻き乱れの位置を変えた場合についても解析を行った。その結果、いずれの場合にも付加的交流損失は、磁界振幅 B_m が大きいほど大きくなり、遮蔽電流が臨界電流値に達し飽和状態になると付加的交流損失は一気に増大することがわかった。

さらに、巻き乱れによる電流の偏流を補正する方法についても考察した。左側の巻き乱れの位置を25巻き目で固定し、右側は巻き乱れが発生したターン以降のすべてのターンを使って少しずつずれを修正するモデルと、巻き乱れが発生したすぐ後のできるだけ少ないターン数でずれを修正してしまうモデルについての解析を行った。発表当日は、2つの修正モデルの解析結果についても報告する。

4. 謝辞

本研究は、イットリウム系超伝導電力機器技術開発の一環として、ISTECを通じてNEDOからの委託を受けて実施したものである。

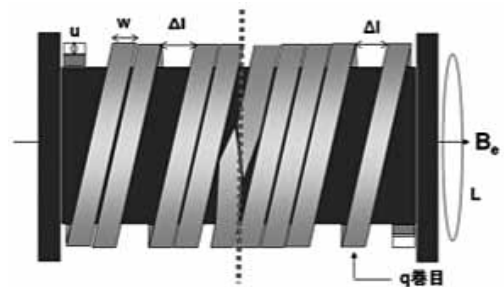


Fig.1 Transposed parallel SC

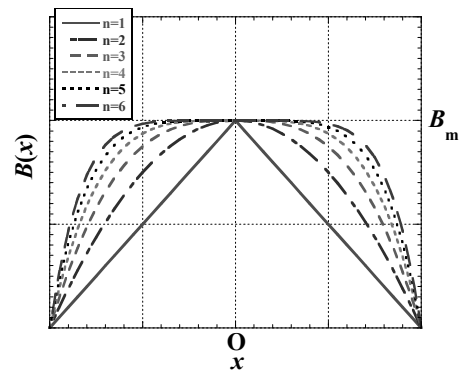


Fig.2 Magnetic field distribution

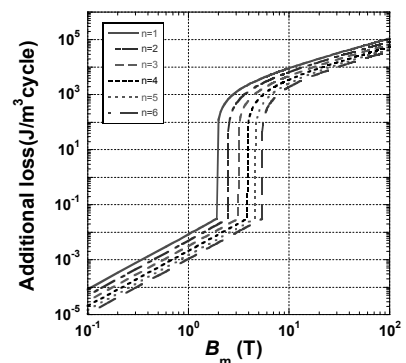


Fig.3 The gap of rolling disorder dependences of the Additional loss

磁気浮上鉄道用高温超電導コイルの基本設計

Design Study of High-Temperature Superconducting Coils for Maglev Vehicles

呂 臻, 宮副 照久, 関野 直樹, 大崎 博之 (東京大学)

Lu ZHEN, Akihisa MIYAZOE, Masaki SEKINO and Hiroyuki OHSAKI (The University of Tokyo)

Email: ro-shin@ohsaki.k.u-tokyo.ac.jp

1. 緒言

超電導磁気浮上鉄道山梨実験線の車両に搭載されている超電導コイルは、低温超電導線である NbTi 線が使用されている[1]。NbTi 線を使用した超電導磁石は実用レベルに達しているが、それが高温超電導線に代替されると、コイルの安定性向上や浮上案内推進特性の向上、あるいは冷却システムの簡略化、運転コストの低減などにつながる事が期待できる[2,3]。本研究では、磁気浮上鉄道用超電導コイルに高温超電導線材を適用することについて、コイルの断面形状に焦点を当てて、電磁界解析と応力解析に基づいて設計検討を行った。

2. モデリングと解析手法

超電導コイルが発生する磁束がどれだけ地上コイルに鎖交するかが、浮上案内推進特性に大きな影響を与える。そこで、地上側の浮上コイルに鎖交する磁束を主評価量として解析を行うため、図 1 に示す超電導コイルモデルを用いた。超電導コイルの高さ H と地上コイルとの距離 g 、超電導コイルの断面積を一定に保ち、コイル断面形状を可変パラメータとして、それをパラメータ $k (k = a/b)$ により表現した。図 1(a)には $k = 0.25, 1, 4$ の場合の超電導コイルと地上コイルのモデルを示し、図 1(b)に特性解析用のレーストラックコイルの 1/2 モデルを示す。

線材特性は、現在市販されている Y 系線材の $J_c - B - T$ 特性を参考に設定した。ここで、 J_c は基板等も含めた線材断面に対する臨界電流密度、 B は磁束密度、 T は温度である。Y 系線材は磁場角度依存性を持つので、線材テープ面に垂直な方向 (c 方向) と平行方向 (ab 面方向) の両方について磁束密度を算出し、評価したが、図 2 には、より条件が厳しい $B_{//c}$ に対して設定した線材特性を示す。

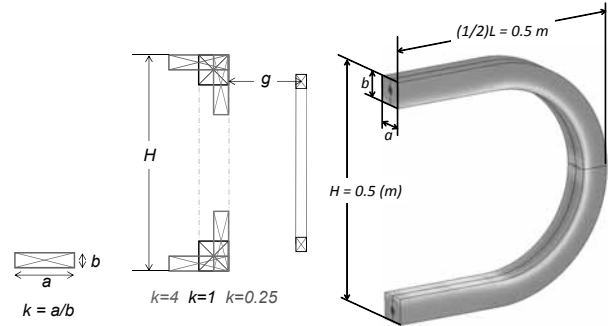
このようなモデルで、地上側浮上コイルに所定の鎖交磁束が得られるようなコイル電流と最大経験磁束密度条件を解析し、線材に必要な運転温度を導出した。また、コイルに加わる応力も解析した。解析は有限要素法電磁界解析ソフトウェア JMAG-Studio により行った。

3. 解析結果

パラメータ k を 0.25 から 4 の範囲で変化させたとき、同じ鎖交磁束量、つまり浮上力を得るのに必要なコイル(線材)電流密度と最大経験磁束密度を図 2 にプロットして示す。解析結果より、必要な運転温度は k にほとんど依存せず、50 K 以下の運転温度が必要であることが明らかになった。

応力解析では、コイル支持が何も無い場合と直線部が固定された場合の 2 ケースの解析を行った。支持が無い場合は k の増加とともにフープ応力は増大し、過大な応力となるが、支持がある場合の応力は 200 MPa 以下で十分小さく、応力上の問題は小さいことがわかった。

コイル断面パラメータ k と超電導コイルの表面積および体積との関係を計算した結果を図 3 に示す。体積が小さければ超電導線材コストを節約でき、表面積はコイルの冷却特性に関係してくる。表面積は正方形断面 ($k = 1$) のときに最小となるが、体積は飽和傾向が見られるが、 k と共に単調増加している。従って、図 3 から単純に最適な k が導出されるわけではないことが明らかになった。



(a) Parameters g, H, k (b) Racetrack coil model

Fig.1 Analysis models

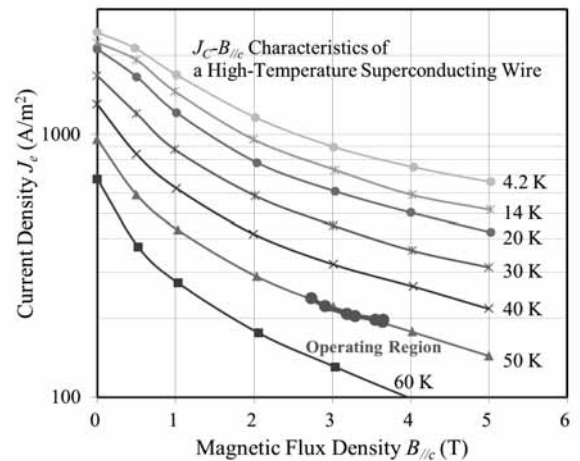


Fig.2 Coil operating region for changing k on YBCO wire performance plane ($J_c - B_{//c} - T$)

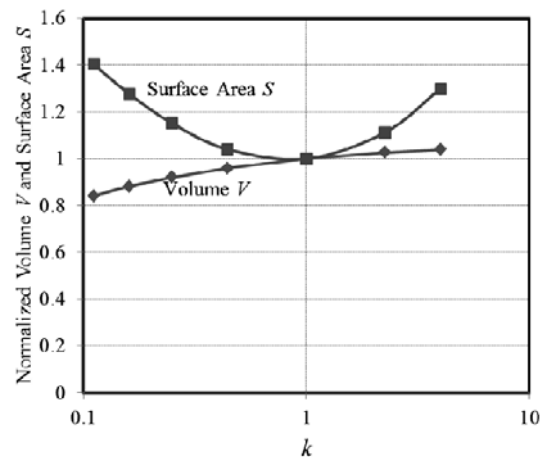


Fig.3 Influence of k on the volume V and surface area S of the superconducting coil

参考文献

1. R. Hellinger, et al., Proc. IEEE, Vol.97 (2009) p.1892
2. H. Ohsaki, Proc. of Maglev 2008, No.92 (2008)
3. K. Nagashima, et al., Proc. of Maglev 2008, No.51 (2008)

線間無絶縁高温超電導コイルにおける常電導伝播特性の検討

Characteristics of the Normal Zone Propagation Behaviors of HTS Coils without Turn-to-turn Insulation

門田 貴昌, 斉藤 彰浩, 金子武志, 朱 鎮弘, 金 錫範

KADOTA Takayoshi, SAITO Akihiro, KANEKO Takeshi, Jinhong JOO, SeokBeom KIM (Okayama University)

E-mail: kim@elec.okayama-u.ac.jp

1. はじめに

高温超電導線材を巻線とした高温超電導コイルは、高い熱的安定性と熱容量を有しているため、クエンチ保護の観点から遅い常電導伝播速度や複雑なクエンチ現象が問題となってくる。

そこで、我々は線間の絶縁を排除した線間無絶縁高温超電導コイルに注目し、線間無絶縁の有効性及び問題点について研究を行っている。線間の絶縁を排除した高温超電導コイルでは、クエンチが生じた場合、層間での電流分流が生じ、局所的な温度上昇抑制等が期待できる。今回は、作製した線間無絶縁コイルを用いて常電導伝播特性の測定を行い、線間無絶縁コイルにおける電流分流特性について検討を行ったので、その結果について報告する。

2. 実験方法

本研究では、高温超電導コイルの線間絶縁の有無による分流特性を比較するために、図 1 に示すような左半分を線間絶縁し、右半分は線間絶縁を施していない試験コイルを作製した。コイルの線間絶縁にはカプトンテープを用い、実験は GM 冷凍機による伝導冷却運転下で行った。模擬コイルが巻かれている銅製ボビンの中心には、線間への電流分流による発生磁場の変動を観測するためのホール素子を取り付けた。

コイル巻線には、銅安定化材が施された YBCO 高温超電導線材を用い、擾乱を模擬するためのひずみゲージを線間に取り付け、ひずみゲージからの発熱により初期常電導転移部を発生させた。また、コイルの長手方向と線間方向へ電圧タップと熱電対を取り付けることで線間方向への絶縁の有無による常電導転移特性を測定した。

3. 実験結果及び考察

試験コイルの運転温度を $83\text{K}(I_c=33.7\text{A})$ に設定し、試験コイルへ 20A の電流を通電したときに最少クエンチエネルギー (MQE) に相当する擾乱を投入した時のコイルに発生する常電導転移に伴うタップ間の電圧変化を図 2 に示す。図 2 では $t = 0\text{s}$ でひずみゲージから擾乱を模擬した熱エネルギーを投入している。擾乱投入と同時に擾乱部が常電導転移し、電圧 $V_{6,7}$ が立ち上がる。その次に長手方向への常電導部伝播による電圧 $V_{5,6}$, $V_{7,8}$ が発生し、その後、ある時刻から線間方向への電圧 $V_{7,8}$, $V_{6,7}$, $V_{5,6}$ が順次下降している。これは、初期擾乱を投入した二層目の長手方向の抵抗が大きくなることにより三層目へ電流分流が起きたと考えられる。

また、図 3 に示したコイル中心部の磁場が減衰する時刻からも電流分流が起きる時刻が予想できる。高温超電導線材は、比較的熱容量が大きいため局所的な温度上昇が起りやすいので、線材が焼損する危険性が高いが、本研究結果より通電電流を線間方向へ分流させることで、

局所的な温度上昇を抑えられたと考えられ、高温超電導コイルの線間無絶縁がコイルの過渡安定性を向上させることが確認できた。そして、同型のコイルにおける線間絶縁を施したコイルと線間の絶縁をすべて排除したコイルについても同様の実験的検討を行う予定である。

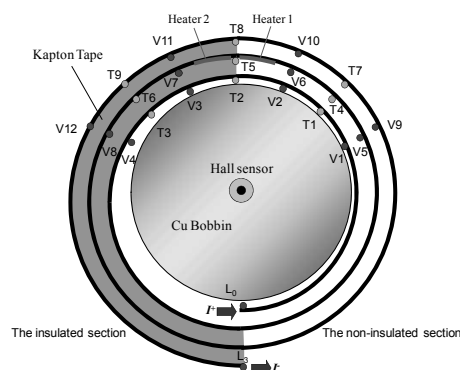


Fig. 1 Schematic top-view of the tested coil with a non-insulated half section.

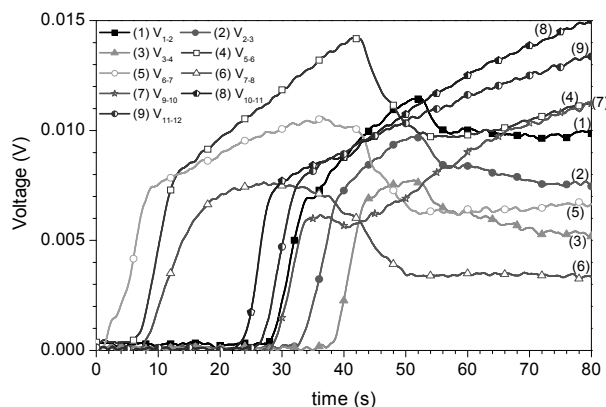


Fig. 2 Measured voltage profiles according to normal transition on tested coil (Fig.1) at $T_{op}=83\text{K}$ and $I_{op}=20\text{A}$.

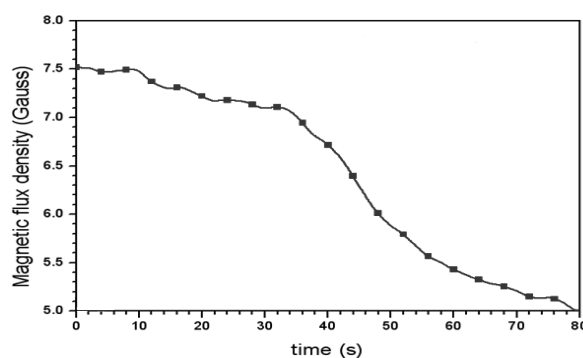


Fig. 3 Measured magnetic flux density at the center of the coil during the current sharing at $T_{op}=83\text{K}$ and $I_{op}=20\text{A}$.

SMES 用伝導冷却 Y 系超電導モデル Cu コイルの通電・伝熱特性評価実験

Thermal Characteristics of Conduction cooled YBCO Model Cu Coil for SMES

鈴木 貴裕, 室町 和輝, 青木 佳明, 石山 敦士(早稲田大学); 式町 浩二, 平野 直樹, 長屋 重夫(中部電力)
 SUZUKI Takahiro, MUROMACHI Kazuki, AOKI Yoshiaki, ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ);
 SHIKIMACHI Koji, HIRANO Naoki, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power)
 E-mail: atsushi@waseda.jp

1. はじめに

現在, NEDOプロジェクトにおいて通電容量 2kA, 絶縁電圧 2kV, 運転温度 20K のSMES用伝導冷却Y系超電導コイルの開発が進められている。超電導コイルの実用化に際しては, (1) 常電導領域の発生を防ぐ, (2) 常電導領域の伝播を防ぐ, (3) 超電導特性の劣化・焼損を防ぐ, という3つの段階を想定した安定性評価基準の確立が求められる。そのためには, コイルの熱的振る舞いを明らかにすることが重要である。現在開発中のSMES用超電導コイルは, Y系テープ線材の周囲をカプトンテープで巻いた上で, エポキシ含浸を施すことになっている。このような超電導コイルの運転温度 20K 領域での通電・伝熱特性を明らかにする必要がある。そこで, 我々はSMES用伝導冷却Y系超電導コイルと同様のターン間絶縁構造を持つ銅テープ巻線から成る伝導冷却モデルコイルについて, 通電・伝熱特性を評価・実験したので報告する。

2. 実験方法

今回は, SMES 用コイルを構成する一つのパンケーキコイルに注目した。コイル内の発熱と冷却板界面の熱流速等を評価するため, 銅テープを巻線したダミーコイルを作製し, 通電試験を行った。試験に用いた銅ダミーコイルを Fig.1 に示す(コイル内半径: 113mm, コイル外半径: 140.5mm, コイル高さ: 24mm, ターン幅: 10.2mm, 1 ターン厚: 0.31mm, ターン数: 20)。導体構成は, SMES 用モデルコイルを想定した 4 枚バンドル導体を用いたダブルパンケーキコイルである。銅ダミーコイルに電流を流した際に生じるジュール熱を超電導コイルにおける交流損失とみなし, コイル内部に熱が生じた場合の温度分布の調査を行った。また, コイルの温度上昇を測定するため, Fig.2 に示す位置にセルノックス温度計を設置した。実験は, 伝導冷却で冷却板を 20K に設定し, 発熱量 0.25W, 1.0W が発生する電流 15A, 30A を通電した。

3. 解析方法

今回実験に用いた銅コイルについて, 有限要素法による数値解析に基づく熱特性評価を行っている。解析モデルは Fig.2 である。解析方法は, 回転対称有限要素法で, 解析領域は Fig.2 に示したコイル・冷却板の断面である。境界条件は冷却板端面の温度を運転温度 20K で固定境界とした。コイル内部の熱的な振る舞いを解析するために, 式(1)に示す熱拡散方程式を用いて数値解析を行っている。

$$C(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot \{k(T) \nabla T\} + Q_j(T) \quad (1)$$

ここで, C: 熱容量[J/m³K], T: 温度[K], t: 時間[s], k: 熱伝導率[W/m K], Q_j: ジュール発熱量[W/m³]である。

4. 実験結果

実験結果を Fig.3, Fig.4 に示す。Fig.3, Fig.4 は横軸が時間, 縦軸が温度の初期温度からの変化量を示しており, 温度の時間変化を示している。今回の実験では, 0.25W の定常発熱がある場合, 温度上昇が最大 0.15K になること, 1.0W の定常発熱がある場合, 温度上昇が最大 0.56K になることが確認できた。温度計の位置は Fig.2 に示すとおりである。また, cel1 と cel2 は上下の冷却板に取り付けてある。また, コイル外部よ

りも内部の方が温度上昇が大きいことが確認できた。現在, 解析結果の妥当性を評価中である。

本研究は「イットリウム系超電導電力技術開発プロジェクト」の一部として NEDO の委託により実施したものである。

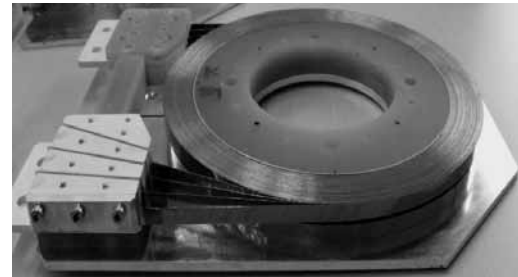


Fig. 1 Dummy Coil (Winding part)

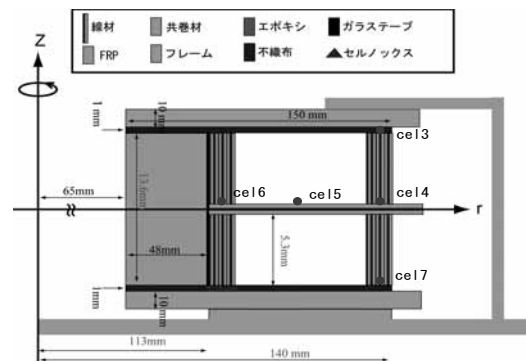


Fig. 2 Simulation Model

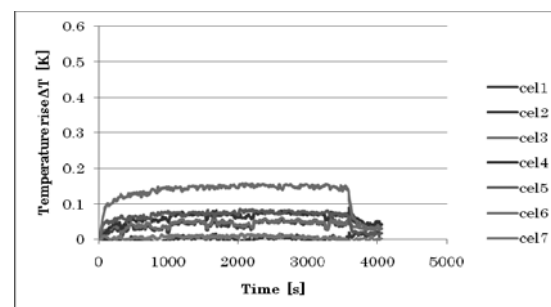


Fig. 3 Time change of temperature (0.25W)

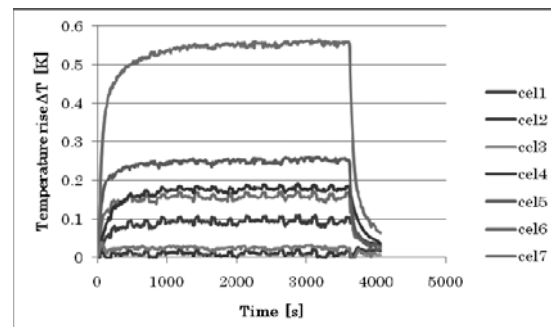


Fig. 4 Time change of temperature (1.0W)

参考文献

1. T.Ando, et.: Abstracts of CSJ Conference, Vol.68(2006) p.44

銅安定化 YBCO テープ線材の熱的安定性 Thermal stability of YBCO coated tape

侯瑩, 小黑英俊, 淡路 智, 渡辺和雄 (東北大); 井上至, 坂本久樹, 安永紳也, 劉勁 (古河電工)
 HOU Ying, OGURO Hidetoshi, AWAJI Satoshi, WATANABE Kazuo (Tohoku Univ.); INOUE Itaru, SAKAMONO Hisaki,
 YASUNAGA Shinya, RYU Jin (Furukawa Electric)
 E-mail: houying@imr.tohoku.ac.jp (9 point)

1. 序論

高温超伝導体(HTS)は、高い臨界温度 T_c を持つために、マグネットに応用することが期待されている。HTS 線材は、高 T_c 特性と広い超伝導—常伝導転移領域によって、臨界電流を超えても微小抵抗状態で安定通電できる場合がある。したがって、YBCO 線材の熱安定性研究はマグネット応用にとって重要である。これまでの結果から、HTS線材の安定性は、従来の常伝導伝搬ではなく、発熱と冷却の熱バランスによって決まることが分かっている[1-2]。

本研究では、銅安定化 YBCO 線材の臨界電流と熱暴走電流を測定し、熱的安定性を分析した。

2. 実験方法

実験に用いたサンプルの仕様を Table.1に示す。線材を直径 40mm の FRP ボビンに約3ターン巻いたコイルを作製した。試料には4つの電圧端子を取り付け、4端子法を用いてサンプルの3箇所を測った。さらに、各電圧タップ間に3個の Cernox™薄膜抵抗低温温度センサーを取り付けてサンプルの温度測定を行った。

Table.1 the thickness of YBCO conductor

Materials and method	thickness
Cu	45 μ m
Sp-Ag	17 μ m
CVD-YBCO	1 μ m
Sputter-CeO2	200nm
IBAD-GZO	500nm
Hastelloy C-276	100 μ m

臨界電流値 I_c は $0.1 \mu V/cm$ の電界基準により決定した。一般的には熱暴走電流 I_{tr} は線材発熱を冷凍機の冷却能力が崩れるときの電流値として定義される。本研究では、2500 s 以内に E に変曲点が観測されるときに最小の電流値を熱暴走電流値 I_{tr} とした。印加磁束密度は 1 T から、10 T まで印加した。また、サンプルの温度は 20 K-40 K とした。

3. 結果と議論

Fig. 1 に I_c と I_{tr} の 38 K における磁場依存性を、Fig. 2 に 10 T 中の温度依存性を示す。 I_{tr} は約 1.2~1.5 I_c で、温度に大きく依存しないことが分かった。

I-V 特性曲線から計算された熱暴走する場合の発熱量 P_{tr} は 10 T, 38 K において約 30 mW となり、磁場減少に伴った若干増加する傾向がある。一方で、 P_{tr} は測定温度に大きく依存しないことが分かった。これは従来の超伝導線材のパワー基準[3]の 300 倍である。

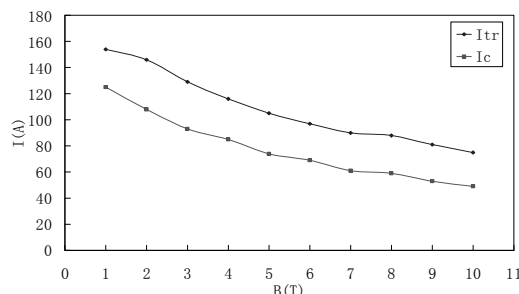


Fig.1 Field dependence of I_c and I_{tr}

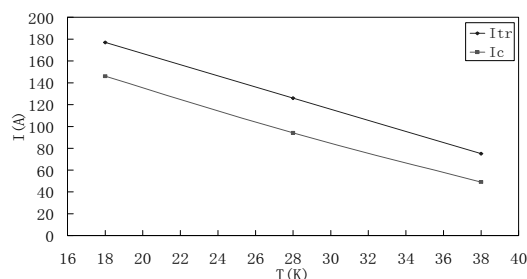


Fig.2 Temperature dependence of I_c and I_{tr}

4. 結論

銅安定化 YBCO 線材の伝導冷却下の安定性評価として、熱暴走電流の測定を行った結果、以下の点が明らかとなった。

- 銅安定化 YBCO 線材の熱暴走電流は、伝導冷却下で臨界電流 I_c の 1.2-1.5 倍となった。
- 熱暴走電流から計算した発熱量は 30 mW となり、これ以下で安定通電が可能である。

References

- Iwasa et al, IEEE Trans. Appl. Supercond., 13(2003)1772.
- 瀬戸寿之ら, 低温工学, 36 (2001) 16.
- A. F. Clark and J. W. Ekin, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. MAG-13, No.1, January 1977

SMES 用伝導冷却高温超電導コイルのクエンチ検出と保護

Quench detection and protection of conduction cooled HTS coil for SMES

室町 和輝, 鈴木 貴裕, 青木 佳明, 石山 敦士(早稲田大学);
式町 浩二, 平野 直樹, 長屋 重夫(中部電力)

MUROMACHI Kazuki, SUZUKI Takahiro, AOKI Yoshiaki, ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.);
SHIKIMACHI Koji, HIRANO Naoki, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power)
E-mail: atsushi@waseda.jp

1. はじめに

現在, NEDO プロジェクトにおいて通電容量 2kA, 絶縁電圧 2kV, 運転温度 20K の SMES 用伝導冷却 Y 系超電導コイルの開発が進められている。その中で, 我々は結合損失を抑えるために素線絶縁した Y 系積層導体を巻線したコイルの安定性・保護の検討を行っている。先に, 導体内の素線に局所的な常電導転移が発生した場合, 素線間の転流を監視することでクエンチ検出が可能であることを数値シミュレーションによって示した⁽¹⁾⁽²⁾。今回は, この結果を踏まえ, 既に提案している「外部保護抵抗によるエネルギー回収に基づく安定化層厚の決定法」⁽³⁾によって安定化層厚を求めたので報告する。

なお, 本研究は「リットリウム系超電導電力技術開発プロジェクト」の一部として NEDO の委託により実施したものである。

2. 転流によるクエンチ検出

高温超電導線材の常電導伝播速度は極めて遅く(数 cm/s), また SMES の実運転においては, 変換器などのノイズによって常電導転移による発生電圧が埋もれてしまい, クエンチ検出が困難になると考えられる。現在検討中のコイルは, Fig.1 のように, 2kA 級導体として YBCO 線材(素線絶縁)を 4 枚積層した集合導体を用いることを想定している。そこで, 常電導転移に伴う導体内の素線間の電流転流を監視するクエンチ検出法について数値シミュレーションにより評価した⁽¹⁾⁽²⁾。

例として, 運転温度 20K, 集合導体内の素線で長手方向 1cm にわたって劣化した場合($I_c=0$)の常電導伝播特性と転流特性を解析した結果を Table 1 に示す。表中の時間と温度は, 偏流(導体内素線の最大電流と最小電流の差)が 100A となった時刻と, その時の最高温度であり 30~50K となっている。以上より, 導体内の転流を監視することによって, 温度がそれほど上昇しない時点でクエンチ検出が可能と考えられる。

3. Y 系線材の安定化層厚の決定

外部抵抗によるエネルギー回収条件より求めた次の式を解くことによって, 安定化層厚を決定することができる⁽³⁾。

$$\left(t_s + \frac{E}{V_m I_0} \right)^{-1} \lambda_c^2 U(I_{stab.}) - \left(\frac{I_0}{SN} \right)^2 = 0 \quad (1)$$

ここで t_s は遮断遅れ時間, E は蓄積エネルギー, V_m はコイル両端の最大電圧, I_0 はエネルギー回収開始時の運転電流, λ_c は安定化層の占積率, U は U 関数⁽³⁾(基板の厚さ l_{stab} に依存), S は線材の断面積, N は集合導体の線材の枚数である。

例えば, 集合導体内の素線で長手方向 1cm にわたって劣化した場合, Table 1 より偏流 100A が検出された時点での最高温度は 30~50K となっている。そこで 50K を初期温度, 最高到達温度 300 K として(1)を用いて必要な銅安定化層の厚さを求めた結果を Table 2 に示す。なお, 外部保護抵抗は 0.75 Ω とした場合を例とした。

4. まとめ

今回は, 転流監視によるクエンチ検出とエネルギー回収に基づく安定化層厚の決定法によって, SMES 用伝導冷却 Y 系超電導コイルのクエンチ保護のために必要な安定化層厚を決定する方法を提案し, その適用例を示した。

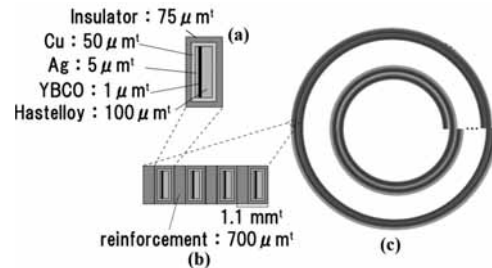


Fig.1 Schematic drawing of (a) YBCO tape, (b) conductor, and (c) pancake coil

Table 1 Time and temperature at quench detection of non-uniform current of 100A in conductor

	1 枚劣化	2 枚劣化	3 枚劣化
待機状態	1.85s 27K	6.75s 37K	1.95s 34K
ピーク状態	1.45s 31K	3.80s 46K	1.50s 41K
系統安定化	1.60s 30K	5.10s 43K	1.70s 39K
負荷変動補償	1.80s 28K	5.85s 41K	2.00s 36K

Table 2 Required stabilizer thickness

Stored energy of toroidal coil	2.4 GJ	
Number of unit coils	180	
Stored energy of unit coil, E	13.4 MJ	
Transport current, I_0	2.16 kA	
Inductance of unit coil, L (including mutual inductance)	5.74 H	
Dump resistance, R	0.75 Ω	
Terminal voltage, V_m	1.62 kV	
Time constant of dumping	7.66 s	
Thickness of YBCO layer, d_{YBCO}	1.0 μ m	
Thickness of Substrate layer, d_{sub}	100 μ m	
Thickness of Substrate layer, d_{reinf}	700 μ m	
Number of tapes in conductor, N	4	
Temperature at quench detection, T_0	50K	
Maximum temperature, T_m	300K	
Delay until protection mode, t_s	0 s	0.5 s
Thickness of copper stabilizer, d_{stab}	123 μ m	137 μ m

参考文献

- (1) A.Ishiyama, H.Ueda, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 80 (2009) p.101
- (2) A.Ishiyama, K.Muromachi, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 82 (2010) p.154
- (3) A.Ishiyama, H.Ueda, et al.: IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol.17, No.2, pp.2430-2433, 2007

パワーメータを用いた高温超伝導コイルの交流損失測定法の検討 Study of Measurement Method of AC Losses in HTS Coils Using Power Meter

前野 友哉, 柴山 誠, 福井 聡, 小川 純, 佐藤 孝雄(新潟大); 塚本 修巳(横浜国立大学)
 MAENO Tomoya, SHIBAYAMA Makoto, FUKUI Satoshi, OGAWA Jun, SATO Takao (Niigata University);
 TSUKAMOTO Osami (Yokohama National University)
 E-mail: fukui@eng.niigata-u.ac.jp

1. はじめに

高温超伝導線材の製造技術が進歩し、長尺で高臨界電流の線材が安定して製造できるようになりつつある。このような背景から、各種電力機器の巻線への適用が現実的に検討されるようになってきた。高温超伝導テープ線材を用いた巻線を製作すると、必然的にテープ面に垂直方向の磁界が加わり、巻線形状によっては交流損失が過大になり、電力機器の実現性そのものを阻害してしまう。従って、低損失な高温超伝導巻線の開発とその基礎となる高温超伝導コイルの交流損失特性の評価が重要な課題である。しかしながら、高温超伝導テープ線材を用いた巻線(コイル)の交流損失特性の詳細な評価は未だ十分には行われていない。特に、交流通電状態の高温超伝導コイルでは無効電力分が損失分比べて非常に大きくなるので、一般には高温超伝導コイルの交流損失の測定は困難であり、測定評価方法は現状未確立である。このような現状に鑑み、本研究では、高温超伝導コイルの交流通電状態の交流損失を電氣的に測定する手法の開発を目的として、交流電力計を用いる方法を提案するとともに、その手法の妥当性を検証する。

2. 測定方法

2.1 ロックインアンプを用いた交流四端子法

短尺の高温超伝導試料の交流通電状態の交流損失を測定する方法として従来から用いられてきた方法は、ロックインアンプを用いる交流四端子法である。この手法をコイルの交流損失測定に応用する場合、ロックインアンプの入力可能電圧が数 V 程度であるので、コイルの端子間電圧を直接入力することはできない。この場合、端子間に発生する誘導電圧をキャンセルコイルなどで抑制する必要がある。しかしながら、コイルが大きくなると、誘導電圧抑制のためのキャンセルコイルも非常に大きなものになり、位相誤差等の測定誤差が大きくなるので、測定が困難になると予想される。Fig. 1(a)にロックインアンプを用いた四端子法の測定回路を示す。

2.2 パワーメータを用いた測定方法

Fig. 1(b)に本研究で提案するパワーメータを用いた交流損失測定法の測定回路を示す。パワーメータは日置電機製の汎用のもを用いる。

2.3 測定用試料コイル

本研究で行った種々の事前検討の結果、ロックインアンプによる四端子法が適用できるのは数十ターン程度の小型試料コイルが限界であることが分かった。よって、本測定では Tab. 1 に諸元を示すターン数 50~100 ターン程度の小型ダブルパンケーキコイル (Coil A・B) について、上記の 2 手法で交流損失の測定を行い、両者測定値の比較を行う。

3. 測定結果

上記の 2 手法で測定した小型ダブルパンケーキコイル交流損失の測定結果を Fig. 2 に示す。Coil A・B とともに、両方法での測定結果は良く一致している。よって、パワーメータを用いてコイルの交流損失の測定が可能であることが分かった。パワーメータは数 kV の電圧を直接入力することが可能であるため(機種による)、これまで不可能であった大きな高温超伝導コイルの交流損失測定への

適用が拓けたと考えられる。

なお本研究は、科学技術振興機構「戦略的イノベーション創出推進事業 (S-イノベ)」のもとで実施している。

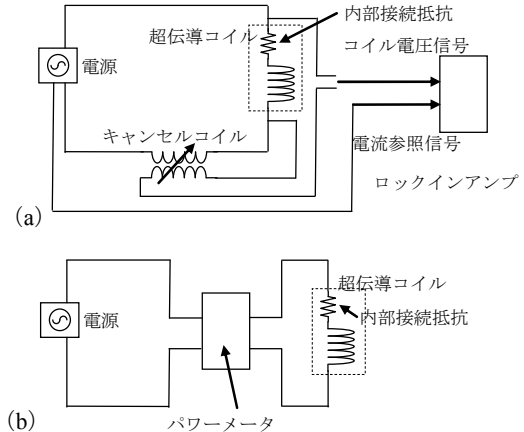


Fig. 1 Schematic illustrations of measurement circuit

Tab. 1 Specifications of sample coils

	Coil A	Coil B
Superconductor/sheath	Bi2223/Ag	Bi2223/Ag
Number of turn	25 × 2	58 × 2
I _c	59.3 A	29.3 A
Inner radius	30 mm	40 mm
Outer radius	37 mm	82 mm

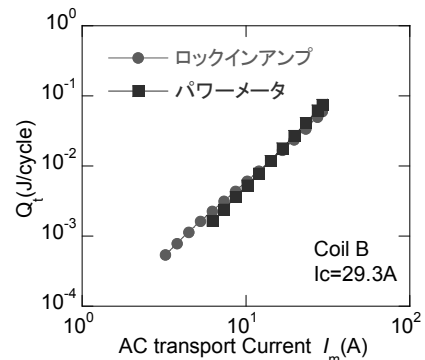
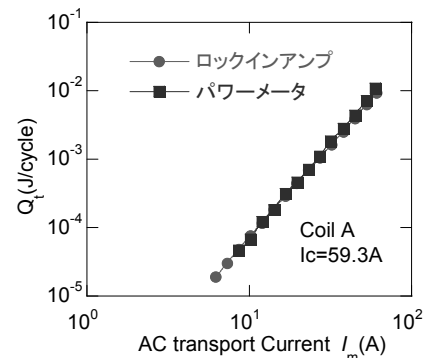


Fig. 2 Measured AC loss in coil A and coil B

Super KEKB 超伝導補正コイル用 8 極電流リードの開発

Study on the 4-pair current leads for the Super KEKB superconducting correction coils

宗 占国, 大内 徳人, 土屋 清澄, 東 憲男, 岩崎 昌子 (KEK)

ZONG Zhanguo, OHUCHI Norihito, TSUCHIYA Kiyosumi, HIGASHI Norio, IWASAKI Masako (KEK)

E-mail: zhanguo.zong@kek.jp

1. Abstract

In the proposed superconducting (SC) magnets system of the Super-KEKB interaction region (IR), about 52 SC correction coils with the current of 50 A would be adopted. With the simulation of the finite elements method (FEM) a compact assembly of vapor cooled current leads was designed, which could energize 4 SC correctors simultaneously. The fabrication and cryogenic test have been completed. This paper will present the thermal and electrical behaviors and the analysis on the experimental data.

2. Introduction

In the final beam focusing system of the superconducting magnets in the proposed Super-KEKB IR about 52 correction coils with some specific functions are designed with the current of about 50 A^[1]. The current leads to energize the SC correctors would be a considerable space in the cryostat system. To reduce the complexity and the required space of the cryogenic system, a compact assembly of the 50 A current leads was designed in which 8 individual leads (4 pairs/2 structures as listed in Table 1) were integrated on a common insulation flange^[2], shown in Fig. 1. After the fabrication and assembly in this April, the cryogenic experiment was performed. With some improvements, we measured the lead assembly again in this September. This paper will discuss some thermal and electrical characteristics of the leads.

Table 1 Design parameters of two lead structures (A and B)

Item	A	B
Operation current (A)	50	50
Cross-section area of helium (mm ²)	10	9.6
Cross-section area of brass (mm ²)	25.2	24.4
Ratio of the areas of helium to brass	0.397	0.393
Heat exchanging length (mm)	690	690
Heat exchanging area (m ²)	0.02	0.021

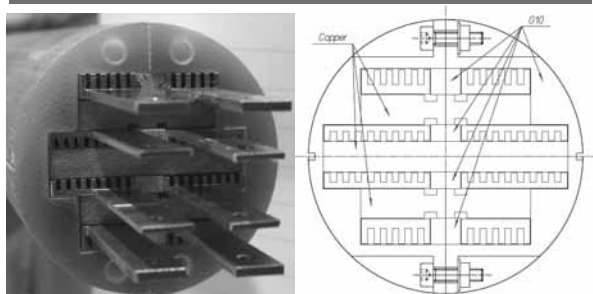


Fig.1 Picture and drawing of the lead assembly cross section.

3. Stable operation in the design mode

The design of the leads was carried out with the FEM and the specification current was about 50 A with cooling helium gas of 2.6 mg/s. In the cryogenic measurement, the leads were stably operated in the design mode for 2.5 hours. The

temperature of both warm and cold ends was stable. The temperature profile along the leads was measured by some temperature sensors in the assembly. In Fig. 2, the comparison between the FEM simulation curve and some measured points was presented. At the warm and cold ends the settings of the simulation boundary conditions were simplified so that there were some deviations. The average measured voltage drop was 86.3 mV and was close to the simulation results of 85.56 mV. The total heat leak of the 8 leads was 0.664 W, which is estimated by the temperature gradient and was higher than the optimum value of 0.416 W^[3].

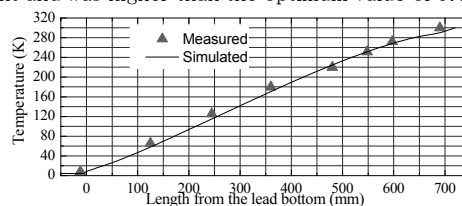


Fig.2 Simulated and measured temperature profile.

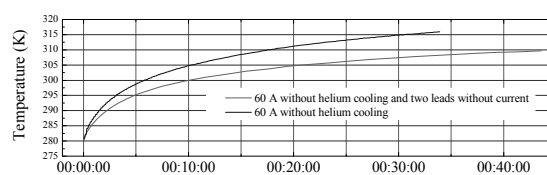


Fig.3 Simulated and measured temperature profile.

4. The transient mode and the effect of the copper anchor

The leads made of brass are not sensitive to excess current or the absence of cooling helium vapor. The transient mode without helium cooling was measured as shown in Fig. 3. When the cooling helium was cut off, the increasing of the lead warm end temperature from 280 K to 300 K took about 5 minutes.

To compensate the possible unbalanced distribution of the helium flow or current for each lead, some copper blocks were placed between every two leads for the thermal interception as shown in Fig. 1. The copper anchor effects were confirmed by the measurement. As shown in Fig. 3, the lead warm end average temperature of 60 A with no helium cooling and no current for two leads increased more slowly than that just without helium cooling. The Joule heat generated in the other six leads energized with 60 A was transferred to the two leads without current through the copper blocks.

5. Conclusion

With some improvements, the leads could stably be operated in the design mode and showed the thermal stability in case of the absence of cooling helium vapor.

6. Reference

1. M. Tawada, et al., in Proc. IPAC10, Paper MOPEB034.
2. Z. G. Zong, et al., in Proc. IPAC10, Paper MOPEB037.
3. Wilson, M.N. Superconducting Magnets Clarendon Press, Oxford, UK(1983).

J-PARC 新 g-2 実験用超伝導磁石システムの開発

- 冷凍機振動などの磁場への影響検討 -

Superconducting solenoid system with high field homogeneity for new g-2 experiment at the J-PARC

- Effect of vibration on field homogeneity -

佐々木 憲一, 飯沼 裕美, 木村 誠宏, 山岡 広, 久米 達哉, 田中 賢一, 荻津 透, 齊藤 直人, 山本 明 (KEK);
 SASAKI Ken-ichi, IINUMA Hiromi, KIMURA Nobuhiro, YAMAOKA Hiroshi, KUME Tatsuya,
 TANAKA Kenichi, OGITSU Toru, SAITO Naohito, YAMAMOTO Akira (KEK);
 E-mail: ken-ichi.sasaki@kek.jp

1. はじめに

東海村にある J-PARC では、物質・生命科学実験施設 (MLF) のミュオンビームラインにおいて、ミュオンの異常磁気モーメント及び電気双極子モーメントを精密に測定する実験(通称 g-2 実験)が計画されている[1]。これは、発散角を 10^{-5} rad 以下におさえた 300 MeV/c の極冷ミュオンビームを磁場強度 3 T の蓄積リングに蓄積させ、ミュオンスピンの歳差運動測定から異常磁気モーメントを求めるという実験である。この実験の特徴の一つは、ミュオンを蓄積するリングに1台の超伝導ソレノイドを使用する事である。磁石に要求されている仕様としては、ビーム蓄積軌道上での磁場均一度が局所的に 1 ppm, ビーム軌道1周の積分磁場として 0.1 ppm となっている。ビームエネルギーと磁場強度から計算されるサイクロトロン半径が 33.3 cm である事を考慮すると、MRI/NMR 用磁石技術を応用した超伝導ソレノイドが蓄積リングに適当であると考えられ、現在詳細設計を行っている。Fig. 1 に概念図を示す。

超伝導ソレノイドの冷却には液体ヘリウム再凝縮方式が検討されている。ここで問題になると考えられているのは冷凍機振動によって励起されるコイルの振動である。高い空間磁場均一度を達成するためには可能な限り磁石システムの振動を抑制する必要がある[2]。特に現状のデザインでは、コイルと鉄ヨークが別々に振動する事で磁場均一度が乱される可能性がある。そこで再凝縮に使用する冷凍機の振動および地面の振動を測定し、それによって励起される振動の磁場均一度への影響を検討する必要がある。まず手始めに、PT 冷凍機のコールドヘッドの振動測定、および実験が予定されている J-PARC・MLF での振動測定を行った。

2. 冷凍機ヘッド振動測定結果

パルスチューブ(PT)冷凍機の 2 段階目ステージについて、レーザー干渉計を用いて振動測定を行った。PT 冷凍機は住友重工製の 1 W と 0.5 W の物を用い、さらに 0.5 W 機については、バルブユニットとコールドヘッドを接続するパイプをフレキシブルチューブに変更した場合についても測定を行った。Table 1 に測定結果を示す。測定は水平方向の x, y 方向について行った。今回測定された変位はその大きさから、主にガス圧の振動による弾性変形と考えられる[3]。

3. 地面振動測定結果

実験が計画されている J-PARC・MLF における地面振動の測定を行った。Fig. 2 に水平方向振動の 0.1Hz 以上での積分変位例を示す。2つのデータは、それぞれ 2010 年 9 月 8 日の 6 時と 23 時のデータを示している。J-PARC は海に隣接しており、各時刻における波高が 0.67 m と 2.09 m と大きく異なっているため、0.3 ~ 0.8 Hz 付近のピークに差が見られる。

上記振動測定のデータを用い、コイルと鉄の相対的なズレによる磁場の変化を現在見積っている所である。これをもとに、磁石振動の許容振幅を決定する。

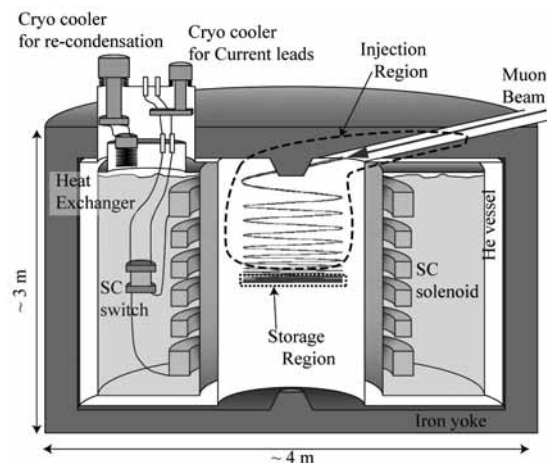


Fig.1: Conceptual design of superconducting solenoid for the new g-2 experiment.

Table 1: Vibration of PT cryocoolers measured by laser interferometer.

Cryocooler	x-direction	y-direction
1 W PT	4.1	3.1
0.5 W PT	1.9	2.9
0.5 W PT with flexible tube	1.4	2.5

(μm)

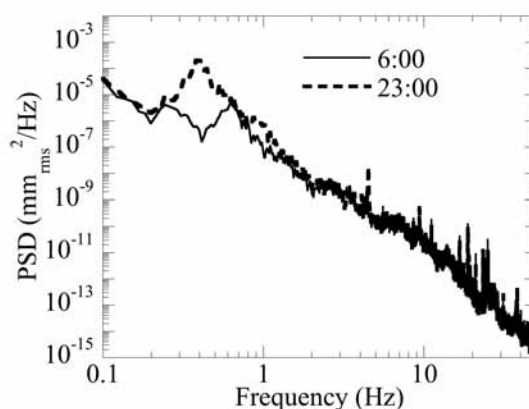


Fig.2: Example of power spectrum density of horizontal ground motion at MLF, J-PARC.

参考文献

1. The J-PARC g-2 collaboration: proposal submitted to J-PARC PAC, 2009.
2. K. Tenmei, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 79 (2008) p.191
3. T. Tomaru, et al.: Teionkogaku, Vol. 38 (2003) p.693-702

高温超伝導線の電流輸送特性を考慮した 高温超伝導加速器用マグネットの磁界設計

Magnetic Field Design of Accelerator Magnet Wound with Coated Conductor Considering Its Current Transport Characteristics

高橋 慶多, 雨宮 尚之, 中村 武恒(京大); 荻津 透(KEK); 吉行 健(東芝); 森 義治(京大);
吉本 政弘(原子力機構); 野田 耕司(放医研); 淡路 智(東北大)

TAKAHASHI Keita, AMEMIYA Naoyuki, NAKAMURA Taketsune (Kyoto Univ.); OGITSU Toru (KEK);
YOSHIYUKI Takeshi (Toshiba); MORI Yoshiharu (Kyoto Univ.); YOSHIMOTO Masahiro (JAEA);

NODA Koji (NIRS); AWAJI Satoshi (Tohoku Univ.)

E-mail: amemiya@kuee.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

筆者らのグループは高温超伝導線の加速器用マグネットへの応用に向けた研究を進めている。今回、GdBCO 薄膜線材の温度、磁界(大きさ, 向き)に依存した通電特性を考慮し、ダイポールマグネットの磁界設計を行ったので報告する。

2. 薄膜線材の通電特性の測定

フジクラ製ハステロイ基板 GdBCO 薄膜線材の通電特性を測定した。幅 5 mm, 超伝導層厚さ 2 μm で, 液体窒素温度, 自己磁界での臨界電流は約 200 A であった。試料に長さ 1 mm, 幅 76 μm のパターン形成を行い, 温度, 磁界強度, 磁界角度を変化させて, 電流電圧特性を測定し, パーコレーション遷移モデルによってフィッティングを行った[1]。なお, 測定は, 東北大学金属材料研究所附属強磁場超伝導材料研究センターで行った。

3. ダイポールマグネットの磁界設計

幅 5 mm, 厚さ 0.2 mm の薄膜線材を用いたコサインシートダイポールマグネットの磁界設計を行った。隣り合う線材間の距離は 0.1 mm, 線材最内側半径は 60 mm, マグネット直線部長さは 1 m とした。簡単のため, 磁化電流は無視した。なお, ビーム軸に沿って多極磁界成分を積分し, 二極成分で規格化した高次成分が参照半径 30 mm において 10^{-4} 以下となるように磁界設計を行った。コイルエンドの設計の際には各薄膜線材の端が展開面において楕円に沿うと仮定し, 等周条件を満たすように配置した[2]。ここで, 許容 flat-wise 曲げ半径は 20 mm, 許容捻りは 2 degrees/mm とした。Fig. 1 に設計したマグネットを示す。二次元断面では, 各線材は周方向に積み上げられている。

通電電流 200 A で, マグネット中心発生磁界は 3.15 T であった。このとき, 運転温度 20 K の場合, 通電電流は臨界電流の約 70% となり, 30 K で通電電流は臨界電流に達した。また, 銅, ハステロイ, NbTi の比熱を基に, 線材の断面において比熱を平均し, エンタルピーマージンを計算し, NbTi と比較したところ, 運転温度 4.2 K での NbTi 線のエンタルピーマージンは $3.1 \times 10^3 \text{ J/m}^3$ であったのに対し, 20 K での薄膜線材のエンタルピーマージンは $1.3 \times 10^6 \text{ J/m}^3$ と, 約二桁大きかった[3]。

4. まとめ

薄膜線材の通電特性を考慮し, それを用いて巻いた加速器用マグネットの磁界設計を行った。このマグネットは冷凍機冷却が可能な温度領域で運転でき, そのエンタルピーマージンは高く, 熱的安定性の観点から非常に魅力的である。

謝辞

本研究は, 産学イノベーション加速事業【戦略的イノベーション創出推進】として, 科学技術振興機構からの委託により実施したものである。

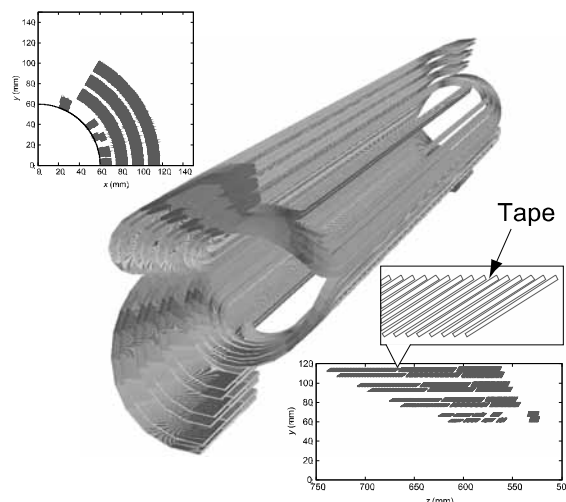


Fig. 1 Shape of designed magnet. Outer three pairs of layers are cut to show inner layers.

TABLE II Outline of design of dipole magnet

Reference radius	30 mm
Radius of magnet bore	60 mm
Length of straight section of magnet	1 m
Length of magnet	1.48 m
Number of turns per 2 poles as single tape	4350
Tape length of coated conductor	11665 m
Maximum torsion	1.5 degrees/mm
Integrated higher multi-pole components normalized by integrated dipole component	Less than 10^{-4}
Typical operation temperature	20 K
Typical operation current	200 A
Magnetic field at center of magnet	3.15 T
Integrated dipole component	3.76 T·m
Critical current	283 A
Peak magnetic field	3.90 T
The maximum magnetic field component perpendicular to tape face	3.04 T

参考文献

1. T. Kiss, et al.: Physica C, 392-396 (2003) pp.1053-1062
2. S. Rüssenschuck: IEEE Trans. Magn., vol. 31, no.3 (1995) pp.1960-1963
3. K. Takahashi, et al.: Presented at ASC-2010(5LPM-05), accepted for publication in IEEE Trans. Appl. Supercond.

バルク超伝導体を用いた短周期アンジュレータの開発

Development of a short period undulator using bulk HTS

紀井 俊輝, 金城 良太, 木村 尚樹, 吉田 恭平, Choi Yong -Woon, Mahmoud A.BAKR, 上田 智史, 高崎 将人, 石田 啓一, 園部 太郎, 増田 開, 大垣 英明 (京大エネ研)

Kii Toshiteru, KINJO Ryota, KIMURA Naoki, Yoshida Kyohei, Choi Yong -Woon, Mahmoud A.BAKR, UEDA Satoshi, TAKASAKI Masato, ISHIDA Keiichi, SONOBE Taro, MASUDA Kai, OHGAKI Hideaki (IAE)

E-mail: kii@iae.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

京都大学エネルギー理工学研究所ではバルク酸化物超伝導体を利用した短周期アンジュレータを提案し[1]、試作機を用いた性能試験を行っている[2]。液体窒素温度で動作する試験機による動作原理の検証及び性能評価を行い、数値計算モデルを用いて20 K程度の運転温度における性能予測を行った。

2. 背景

放射光発生用のデバイスとして用いられているアンジュレータまたはウイグラーでは、電子蓄積リングや電子線線型加速器で得られる電子ビームを周期的に蛇行運動させることにより放射光を発生している。より短波長の放射光を発生させるためには、蛇行運動の周期を短くするかビームエネルギーを上げる必要がある。そのため、近年開発が進められている短波長X線の発生を目指す放射光発生装置の規模は大きくなり、またここで用いられるアンジュレータまたはウイグラーの蛇行周期は短いものが必要になってきている。

巨大化する放射光発生装置をより小型化し普及を目指すためには、これまで以上に短周期の蛇行装置の実現が不可欠であり、真空封止アンジュレータ、冷却永久磁石アンジュレータ、超伝導電磁石アンジュレータなどの開発が進められてきた。当研究グループではバルク超伝導磁石の高い性能をアンジュレータへ応用するために、短周期での強磁場発生が可能で、かつ高い冷却性能、長時間の安定化、磁場制御の精密化が可能なアンジュレータについて研究を進めてきた。このようは背景のもと、バルク超伝導体を周期的に重ね合わせ、単一のソレノイドの中に保持する構造を持つバルク超伝導スタガードアレイアンジュレータを考案し、原理実証試験、性能試験、数値計算モデルの開発等を進めてきた。

3. バルク超伝導スタガードアレイアンジュレータ

(Bulk HTSC Staggered Array Undulator)

バルク超伝導スタガードアレイアンジュレータと呼ぶこのアンジュレータはバルク超伝導体をソレノイド中にスタックした構造を持ち、超伝導転移後にソレノイド電流を変化させることで、ソレノイド中心軸上に交番磁場を生成するものである。バルク超伝導体は新日鉄 QMG DyBaCuO を用いた。Fig. 1a に示すような半円形のバルク超伝導磁石と銅製スペーサーを Fig. 1b に示すように交互に重ね合わせたアレイがアンジュレータ用バルク磁石の基本構造である。このアレイを Fig. 2 に示すように冷媒により冷却可能な2重真空ダクトに挿入し、さらにソレノイド中心に配置したものがバルク超伝導スタガードアレイアンジュレータである。

動作原理を以下に述べる。超伝導転移温度以下で外部ソレノイドにより磁場を変化させると、各バルク超伝導体には磁場の变化を打ち消すように超伝導電流が誘導される。この超伝導電流によりソレノイド中心軸上に周期的な交番磁場が発生する。本方式の利点としては、単一のソレノイドで励磁することで周期磁場の発生が可能である、磁場強度を変化させる際に駆動機構が不要である、バルク超伝導体の冷却が容易であるといった点があげられる。

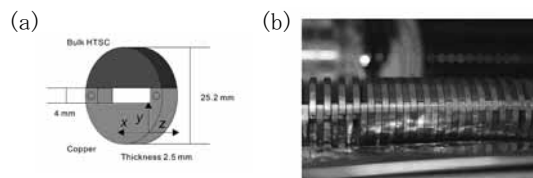


Fig. 1 (a) Half period of Undulator (b) Stacked array of bulk magnet

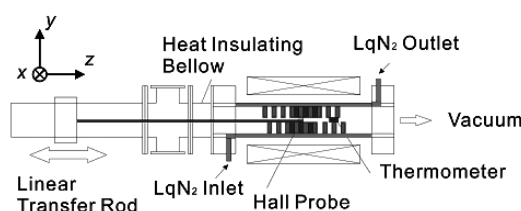


Fig. 2 Schematic drawing of Bulk HTSC SAU

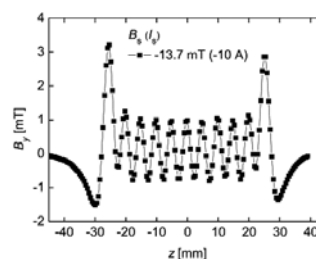


Fig. 3 Periodic magnetic field at 77K

4. 磁場生成結果及び性能予測

77Kまで冷却後にソレノイドによりZ方向磁場 $B_z = 13.7$ mTを印可した際に得られた周期磁場をFig. 3に示す。この時アンジュレータ中心における磁場振幅は0.8 mTであった。さらにZ方向磁場を変化させ磁場振幅を制御することも可能であった。バルク超伝導体内部のループ状の誘導電流を模擬する数値計算モデルを作成し評価を行ったところ、およそ100 A/mm²の臨界電流密度でバルク外周から電流が誘起されているとしたところ、生成される磁場を再現することができた。数値計算により臨界電流密度が3.5 kA/mm²まで増加した場合(20 K程度に相当)の磁場振幅の計算を行ったところ、周期10 mm、ギャップ4 mmの場合0.8 T程度の交番磁場が生成できることが予測できた。

謝辞

本研究は科研費21340057の助成を受けたものである。

参考文献

1. T. Kii, et al., "DESIGN STUDY ON HIGH-TC SUPERCONDUCTING MICRO-UNDULATOR", Proceedings of FEL 2006, (2006) p653
2. R. Kinjo, et al., "BULK HIGH-TC SUPERCONDUCTOR STAGGERED ARRAY UNDULATOR", Proceedings of FEL 2008, (2009) p473

ヘリカル炉に向けたマグネットと支持構造物の構造解析

Mechanical behavior analysis of a helical coil and a support structure for the LHD-type fusion magnet

田村 仁, 今川 信作, 柳 長門, 高畑 一也, 相良 明男(核融合研)

TAMURA Hitoshi, IMAGAWA Shinsaku, YANAGI Nagato, TAKAHATA Kazuya, SAGARA Akio (NIFS)

E-mail: tamura@nifs.ac.jp

1. はじめに

ヘリカル炉はプラズマ電流を必要としない等、定常運転に有利な核融合炉として期待されている。現在概念設計が進められているヘリカル炉FFHRは1対のヘリカルコイルと2対のポロイダルコイルで構成される。ヘリカルコイルは形状、コイル内部構造ともに複雑なため、マグネットシステム設計の初期段階でいくつもの装置パラメーターを考慮した評価は容易ではない。これまで、ヘリカルコイルを円形コイルにモデル化し、コイル内部の解析を行っている[1]。また、ヘリカル炉においてはメンテナンススペースの確保のため、大きな開口部をもつ支持構造が求められており、このような種々の支持構造での構造解析を行うことが求められている。そのため、ヘリカルコイルを円形コイルモデルに置き換えて構造計算した結果の妥当性について検証を行った。

2. 解析モデル

ヘリカルコイルの電流中心における軌跡は、主半径を R_c とするトーラス座標系 (Fig.1) において次式で定義される。

$$\theta = \frac{m}{l} \phi + \alpha^* \sin\left(\frac{m}{l} \phi\right) \quad (1)$$

ここに、 θ 、 ϕ 、 l 、 m 、 α^* はそれぞれ、ポロイダル角、トロイダル角、コイル数、周期数、ピッチ変調係数である。FFHR2m1 では、 $l=2$ 、 $m=10$ 、 $\alpha^*=0.1$ 、 $R_c=14.0\text{m}$ 及び、電流中心の小半径=3.22mである[2]。この場合、周期対称性により 72° を基本セクタとして考慮すればよい。式(1)よりヘリカルコイルの曲率半径が求められ、FFHR2m1 の場合、トロイダル角に渡って5.25mから6.0mの間で変化する。全体の平均曲率半径は5.48mとなる。この平均曲率半径をコイル中心半径とする実際のヘリカルコイルと同じ断面形状をもつ円形のコイルをモデル化し、コイル内部の応力分布を計算した。この結果と比較するために、ヘリカル形状をそのままモデル化した3次元モデルでも解析を行った。

ヘリカルコイルに作用する電磁力は、曲率半径と同様にトロイダル角に渡って変化し、コイル巻き線方向に垂直で小半径側に作用するフープ力とそれぞれに垂直な方向に作用する転倒力に分解することができる。フープ力は最大値がおおよそ110MN/mである。一方、転倒力はコイル全体ではバランスしているが、最大50MN/mの大きさを持つ[3]。3次元ヘリカルモデルではこれらの電磁力を有限要素モデルの要素ひとつひとつに忠実に与えて計算した。ただし、ここでは支

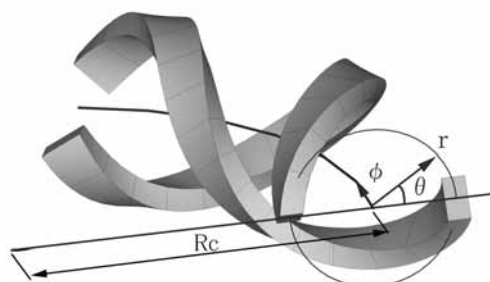


Fig.1 The coordinate system used to define the helical coil locus.

持構造物をモデル化していないため、ヘリカルコイル全体が厚いトーラスシェルの形状の支持構造物に囲まれていることを想定し、コイル断面の面外変形がないものと仮定して計算した。円形コイルモデルでは、コイル中心半径を5.5mとし、断面を構成する要素ひとつひとつの位置における電磁力について、トロイダル方向に対して平均値を求め、さらに断面全体での電磁力の総計が110MN/mとなるように一定値を加算して与えた。コイルの物性値は仮にヤング率150GPa、ポアソン比0.3の等方性として与え、3次元モデルと円形コイルモデルに発生する応力の比較をした。

3. 結果

3次元モデルでの計算結果ではフープ力による応力が大きい結果が得られたため、フープ力による挙動を円形コイルモデルと比較した。Fig.2とFig.3はそれぞれ3次元ヘリカルモデルと円形コイルモデルにおけるフープ方向の応力分布を示す。内側赤道付近のコイル内周側に最大応力が発生しており、円形コイルモデルで得られた最大応力はこの値に近く、コイル断面内の分布状態も3次元モデルに近い結果が得られている。変形量も同様の位置で最大値を示すが、これも円形コイルモデルで得られた最大とほぼ等しい結果となった。これらの結果をもとに、より詳細な断面構成を円形コイルにモデル化し、導体、絶縁物、コイルケースの機械的挙動を評価することに成功した。この計算は支持構造物の形状により影響を受けると予想されるため、より具体的に支持構造物をモデル化した場合との関係について検討が必要である。

参考文献

1. H. Tamura, et al.: J. Phys.: Conf. ser. 97 (2008) 012139
2. A. Sagara, et al.: Fusion Eng. Des. 83 (2008) 1690
3. S. Imagawa, et al.: Nucl. Fusion 49 (2009) 075017

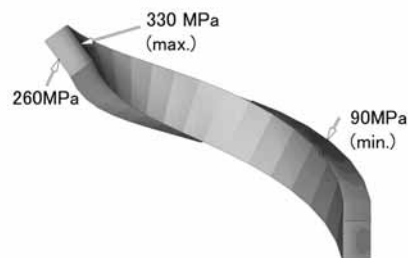


Fig.2 The hoop stress distribution in 3-D model by the hoop force loading.

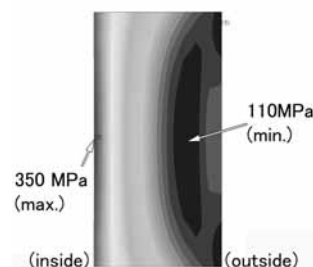


Fig.3 The hoop force distribution in 2-D model axisymmetric by the hoop force loading.

YBCOテープ線材を用いた直流リアクトル用トロイダルコイルの特性

Properties of toroidal coil using YBCO tapes for DC reactor

山本昌弘, 原田直幸, 内藤裕志, 植田清隆(山口大); 津田 理, 濱島高太郎(東北大)
古瀬充穂, 淵野修一郎(産総研); 野口 聡(北大)

YAMAMOTO Masahiro, HARADA Naoyuki, NAITO Hiroshi, UEDA Kiyotaka (Yamaguchi University)
TSUDA Makoto, HAMAJIMA Takataro (Tohoku University)

FURUSE Mitsuhito, FUCHINO Shuichiro (AIST); NOGUUCHI So (Hokkaido University)

E-mail: p053vj@yamaguchi-u.ac.jp

1. はじめに

放射状交流系統で構成されるコンビナート内の工場や事業所間を直流で連系することで、省エネ化や高信頼化を図ることが可能となる。[1]この直流連系で必要となる低損失の平滑リアクトルを開発するため、YBCO 超電導テープ線材を用いてモデルコイルを製作し、コイルの臨界電流[2]や損失等の測定[3]を実施した。本報告では、YBCO コイルの電流-電圧特性について述べる。

2. ダブルパンケーキコイルの製作

ダブルパンケーキコイルには、幅 4[mm]、厚さ 0.1[mm]の市販の YBCO テープ線材[4]を用いた。この線材は両面に厚さ 20[μ m]の銅が配置され、臨界電流は 80~100[A]である。Fig.1(a)に示すコイルは最も内側のターンを半田接続して製作した。また、コイルの剛性を高めるためにエポキシ樹脂で含侵を行った。コイルの内半径は 37[mm]、外半径は 70[mm]、1個のコイルのインダクタンスは 9.9~10.1[mH]である。8個のコイルを直列に接続し、Fig.1(b)に示すように配置してトロイダルコイルとした。

3. ダブルパンケーキコイルの電流-電圧特性

含侵後のダブルパンケーキコイルの液体窒素中における臨界電流を求めるため、個々のコイルに通電する電流を増加させ、電流-電圧特性を測定した。Fig.2に示すように、コイル 2, 3, 6 では比較的小さい電流値から通電電流の増加と共に発生電圧が増加した。これらのコイルの発生電圧は 10[A]程度までほぼ直線的に変化していることがわかった。また、コイル 4 では通電電流 36~39[A]の範囲において発生電圧が不連続に増加していた。

そこで、コイル 4 の通電電流を 47[A]まで増加させ、その後減少させたときの電流-電圧特性を測定した。その結果を Fig.3 に示す。Fig.3 には比較のためコイル 1 の特性も示している。コイル 1 では通電電流の増減に対して発生電圧の差はほとんどなかった。一方、コイル 4 では通電電流を増加させる過程と減少させる過程で発生電圧が不連続となる部分があり、この部分では通電電流を増加させる過程に比べて減少させる過程での発生電圧が大きくなることがわかった。このことは、臨界電流の近傍で発熱する領域が限られた範囲で一気に広がり、一度温度が上昇した領域は冷却されにくくなっているものと考えられる。

参考文献

1. M. Tsuda, et al.: The Papers of Joint Technical Meeting on Power Engineering and Power Systems Engineering, IEE Japan, PE-10-007, PSE-10-051 (2010) p.39
2. N. Harada, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol.81 (2009) p101
3. M. Tsuda, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol.83 (2010) 2D-a12
4. <http://www.superpower-inc.com/>

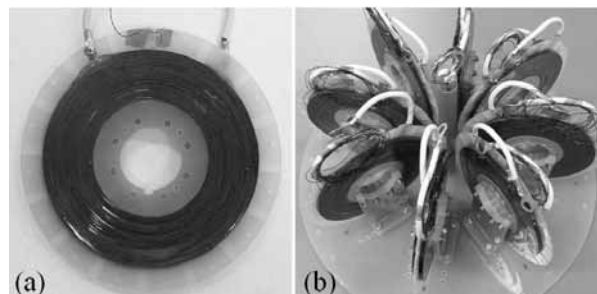


Fig.1 Double pancake coil and toroidal coil.

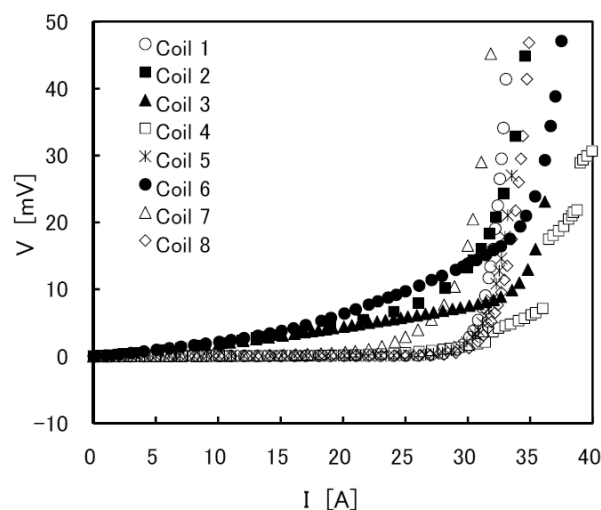


Fig.2 Current-voltage characteristics of double pancake coils.

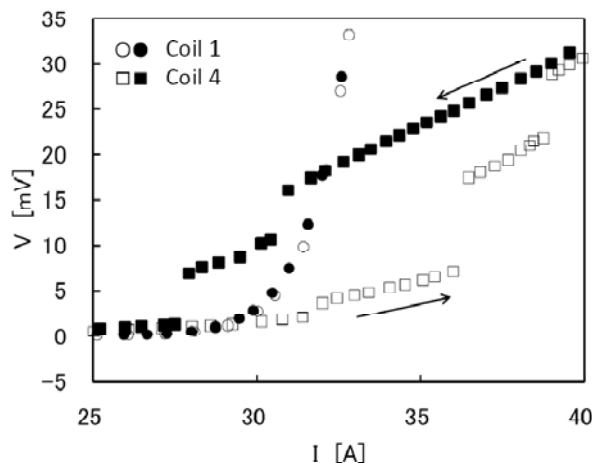


Fig.3 Current-voltage characteristics of coil 1 and coil 4.

YBCO 薄膜超電導体を用いる小型 NMR 用マグネットの積層構造に関する研究

Study on stacked structure issues for compact NMR magnet using YBCO thin film superconductors

木本 敬章, 今井 諒, 矢野 順一, 金 錫範 (岡山大学) ;
S. Y. Hahn, 岩佐 幸和 (MIT) ; V. John (AMSC) ; 富田 優 (鉄道総研)
E-mail: kim@elec.okayama-u.ac.jp

1. はじめに

核磁気共鳴 (NMR : Nuclear Magnetic Resonance) 診断装置はタンパク質などの機能や構造解析に有効なツールとして注目されている。しかし、装置が非常に高価・大型であり、大学などの施設で導入されているものの、研究室や個人で自由に使用できないのが現状である。もし、小型で安価な NMR 装置が開発できれば、研究室や個人で高性能な NMR 診断装置を用いる前の基礎診断などが可能となり、医学分野や食品開発などの幅広い分野の急速な進展が見込まれる。

我々は、高温超電導バルク体や薄膜を用いた小型 NMR 用マグネットの開発を行ってきており、その有効性について報告してきた[1]。しかし、YBCO 薄膜高温超電導体は、金属基板の結晶方位を配向させるための圧延プロセスにより臨界電流密度が圧延方向に対して強い異方性を示していることが明らかになった。このような臨界電流密度の異方性は、線材応用とは異なり超電導体の捕捉磁場を利用するマグネット応用においては非常に大きな問題となる。そこで、本研究では、YBCO 薄膜を積層する際に、圧延方向に対してどのように積層すべきかについて実験的に検討したので、その結果について報告する。

2. 小型 NMR 用マグネットの概要

本研究で開発する NMR 装置は、酸化物超電導体の強力な捕捉磁場を利用するものであり、外部磁場印加装置である励磁用の超電導マグネットの室温空間に低温容器に入った NMR 用マグネットを配置して磁場中冷却方式 (FC 法 : Field cooling Method) を採用して酸化物超電導体を着磁させる。酸化物超電導体が着磁された後、低温容器ごと励磁用マグネットから取り出して NMR 用マグネットとして使用することが可能となるため非常にコンパクトな装置を実現できる。本研究の当面の目標は、直径 20mm の球状測定空間に 4.7T (200 MHz 相当) の均一磁場を発生させることであり、上記の目標を達成するためには、酸化物超電導薄膜の性能向上を始め、マグネットの積層構造を最適化させる必要があると思われる。

3. 実験方法及び結果

Fig. 1 に実験に用いた YBCO 薄膜超電導体の形状と寸法および3パターンの積層構造を示す。本研究では、金属基板の圧延方向に対して 22.5°、90°、0°に積層したものについて検討した。また、積層構造による内部磁場分布を考察するためにそれぞれ12枚積層して行った。Fig. 2 に、12枚の YBCO 薄膜を積層したものに印加磁場 0.1 T、FC 法によって各試料に捕捉された磁場分布を示す。測定結果は、試料表面の高さ方向へ 0.5 mm 離れた平面 (60×60mm²) における磁場分布を表している。Fig. 2 の結果より、圧延方向に対して同じ方向に積層したパターン 3 は、四角形に近い磁場分布を示しているのに対して、他の積層パターンにおいては中心部に円形の磁場分布が形成されていることが確認できた。従って、内部空間に円形の均一な磁場分布を得るためにはパターン 1 と 2 を用いた方が効果であると考えられる。

次に、500枚の YBCO 薄膜を Fig.1 のパターンで積層して、

1T の印加磁場による YBCO 薄膜マグネットの内部中心での高さ方向の磁場強度分布および規格化したものを Fig.3 に示す。Fig.3 の結果より、試料の測定空間となるマグネットの内部磁場強度は、パターン 2 と 3 がパターン 1 に比べて優れているため、磁場強度と空間的磁場均一度を考慮した場合は、パターン 2 の方が最も適切であると思われる。そこで、500 枚の YBCO 薄膜をパターン 2 で積層した薄膜マグネットを GM 冷凍機を用いた伝導冷却運転下の 30K で着磁させて測定した結果、0.95T の最大捕捉磁場強度が得られた。

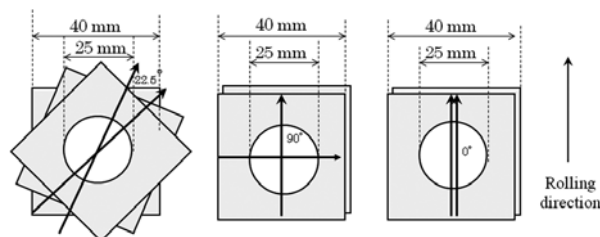


Fig.1 Stacking method of YBCO thin film

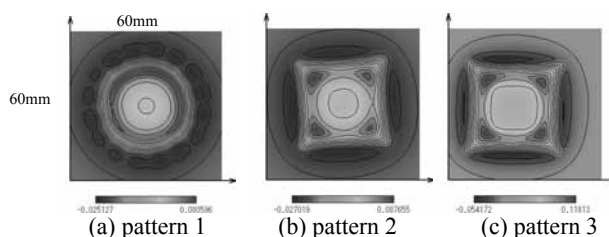


Fig. 2 Measured magnetic field distribution of twelve-stacked YBCO thin film with 3 type patterns.

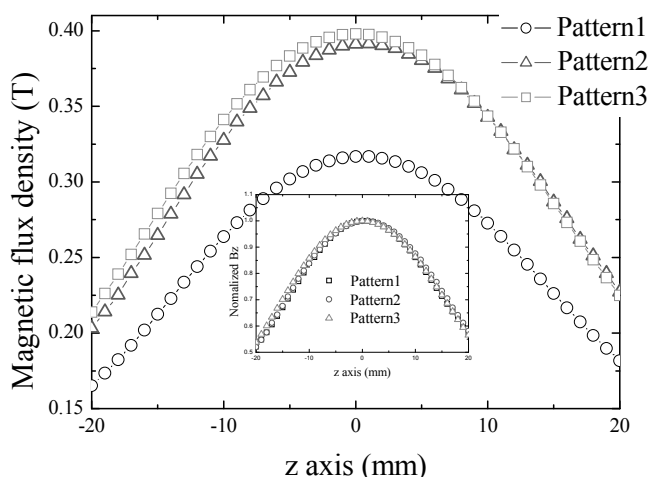


Fig. 3 Measured magnetic distributions along the axial direction of stacked YBCO thin film with 3 type patterns at 77K. (Inset figure shows the normalized Bz profiles)

参考文献

- S. Kim, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 81 (2009) p.114

超伝導球形ソレノイドマグネットの設計

Design of Superconducting Spherical Solenoid Magnet

細山謙二 (高エネ研)

Kenji Hosoyama (KEK)

E-mail: kenji.hosoyama@kek.jp

1. はじめに

エネルギー貯蔵用の超伝導マグネット装置では、大きい空間に高い磁場を発生させる必要があり、単純なコイル形状のソレノイドマグネットが利用されることが多い。また、加速器の偏向磁石等に使用される双極磁石もこの候補に挙げることができる。ここで提案する球形ソレノイドマグネットは、ソレノイドコイルと双極コイルの特徴を併せ持つ球形のコイルで、エネルギー貯蔵に適していると考えられる。球形ソレノイドマグネットが作り出す磁場の特徴についての議論を行うとともに、実証試験用の小型の超伝導球形ソレノイドコイルの設計を行う。

2. 球形ソレノイドマグネットが作り出す磁場と特徴

円形断面の双極マグネットでは、コイルの中間部から上下に向かって電流が減少する、所謂、 $\cos\vartheta$ 型の電流分布を採用することにより理想的な双極磁場がえられる。実際のコイルでは2層のコイルや複数のコイルブロックを組み合わせてこの電流分布を近似的に作り出している。

提案する球形ソレノイドマグネットは球の表面に線材を巻きつけた構造をしており、双極マグネットの場合と同じように、赤道部から両極に向かって $\cos\vartheta$ 的に減少する電流分布を作り出すようなコイルを考える。

双極マグネットではコイルに働く強い電磁力を支えるために頑強な支持構造が必要になるが、球形ソレノイドマグネットでは円形のソレノイドコイルが積層された構造をしており、ソレノイドマグネットの場合と同様に、線材に働く強い電磁力はフープ力として線材で支えることができる。

半径 R_1 の球上に厚みのない $I_0 \cos\vartheta$ の電流分布を配置し、半径 R_2 には μ 無限大の磁気シールドがある場合を想定して Maxwell の方程式を解くと、コイルの内部と外部の磁場 B は次の式で与えられる。

球コイルの内部 ($r < R_1$)

$$B_\theta(r, \vartheta) = \frac{2}{3} (1 + \frac{1}{2} (R_1/R_2)^3) \mu_0 I_0 \sin\vartheta$$

$$B_r(r, \vartheta) = \frac{2}{3} (1 + \frac{1}{2} (R_1/R_2)^3) \mu_0 I_0 \sin\vartheta$$

球コイルの外部 ($R_1 < r < R_2$)

$$B_r(r, \vartheta) = -\frac{1}{3} (R_1/R_2)^3 (1 + 2(R_2/r)^3) \mu_0 I_0 \cos\vartheta$$

$$B_\theta(r, \vartheta) = \frac{1}{3} (R_1/R_2)^3 (1 + 2(R_2/r)^3) \mu_0 I_0 \sin\vartheta$$

磁気シールドがない場合は $R_2 = \infty$ とすることにより得られ、コイル外部への磁場のしみだしは $1/r^3$ の依存性をもつ。

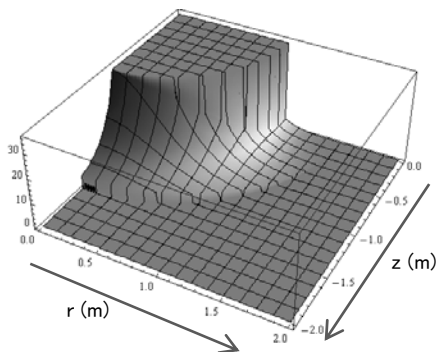


図1 磁気シールドを持つ球形ソレノイドマグネットの磁場 B の二乗の分布の計算例

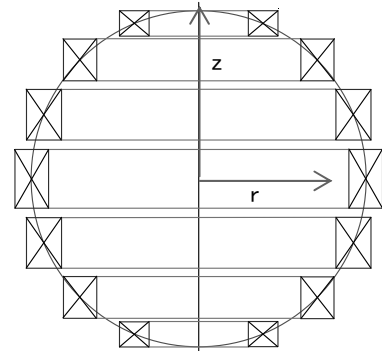


図2 半径 5cm の球面に 7 台のソレノイドでブロック近似した小型の超伝導球形ソレノイドコイルの断面

図1に $R_1 = 1 \text{ m}$, $R_2 = 1.5 \text{ m}$ の球形ソレノイドマグネットの磁場の二乗の分布を示す。球形コイルの内部に一樣な磁場が閉じ込められ、極の部分から磁場がしみだしていることがわかる。

3. 超伝導球形ソレノイドマグネットの設計

球形ソレノイドマグネットの実証試験用に、1mm 径の超伝導線材を仮定して、コイル半径 10cm の小型のマグネットを設計した。ここでは、図2に示すように、 $\cos\vartheta$ の電流分布が近似的に得られるように、各ブロックコイルの巻き数、位置、幅を決定した。この配置は最終的には磁場の集中の緩和や、コイルボビンの構造、強度、組立などを考慮して最適化を行う必要がある。

電流 200A で励磁した時の磁場 B の絶対値の分布を図3に示す。理想的な電流分布の場合に比べて分割したコイルの付近での多少の磁場の集中がみられるが球形ソレノイドマグネットの特徴を持っていると考えられる。

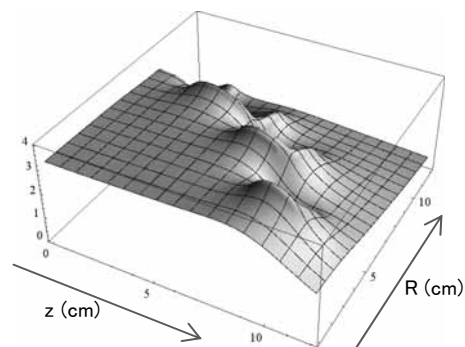


図3 ブロック近似の球形ソレノイドマグネットの磁場 B の絶対値の分布

4. まとめ

理想的な $\cos\vartheta$ の電流分布の超伝導球形ソレノイドマグネットの磁場分布を解析的に求めて、(1) 球形ソレノイドマグネットの作る磁場の特性を調べた。(2) 実証試験を行うためにブロック近似した半径 5cm の小型の超伝導球形ソレノイドマグネットを設計した。

重粒子線がん治療用回転ガントリーのための超伝導マグネットの構造設計

Structural design of superconducting magnets for a rotating gantry in heavy particle radiotherapy

尾花 哲浩(NIFS); 荻津 透(KEK)

OBANA Tetsuhiro (NIFS); OGITSU Toru (KEK)

E-mail: obana.tetsuhiro@LHD.nifs.ac.jp

1. はじめに

粒子線がん治療では、患者の体軸を中心にして、360 度回転することが可能な装置である“回転ガントリー”を使用することで、任意の方向から粒子ビームを患者に照射できるため、より効率の良いがん治療が可能となる。現在稼働中の陽子線用回転ガントリーには、鉄を用いた常伝導マグネットが使用され、装置の直径が約 10 m、総重量が約 100tの規模となっている。今後開発が期待されている重粒子線用回転ガントリーには、陽子線より数倍もの高いエネルギーの重粒子に対応するため、より一層の大型化、重量化が必要となる。そこで、本研究では、重粒子線用回転ガントリーの軽量化及び小型化を目指すために、重粒子線用回転ガントリーに装備する超伝導マグネットの開発研究を進めている[1]。本講演では、重粒子線用回転ガントリーに装備する超伝導マグネットの構造計算について発表する。

2. 超伝導ダイポールマグネットの詳細

Fig.1 に重粒子線用回転ガントリーに装備する超伝導マグネットの断面形状を示す。本マグネットは、径 0.9 mm の NbTi 超伝導線を用いた $\cos \theta$ 型(鞍型)コイル、鉄カラー(純鉄)、SUS 配管、真空容器(炭素鋼SS400)から構成される。 $\cos \theta$ 型コイルは 26 層からなり、コイル内径は 150 mm である。マグネットに要求される磁場強度は 1.5 T 及び 3.0 T、また要求される磁場精度は、コイルポア内の参考半径 40 mm において 1.0×10^{-3} である[1]。

3. 計算内容と拘束条件

汎用有限要素法ソフト ANSYS を用いて、マグネット中心磁場 3 T 時におけるダイポールマグネットの磁場計算、及び構造計算を行った。磁場計算では、Fig.1 に示した断面を有する計算モデルを使用して、超伝導線に生じる電磁力を求めた。その後、磁場計算で得られた電磁力を用いて、構造計算を行った。構造計算では、計算を簡略化するため、コイルと鉄カラーからなる計算モデルを使用した。ただし、コイルと鉄カラーの界面では、境界要素を用いた。

構造計算を行う際、計算モデルの Mid-plane 上に接する節点に対して、Y 軸(縦)方向の動きを拘束した。また、コイル最内部で Mid-plane 上に接する2つ節点のうち1つに対しては、X 軸(横)方向と Y 軸(縦)方向の動きを拘束した。

4. 計算結果

Fig.2 に、マグネット中心磁場 3 T(通電電流 140 A)時におけるマグネット内部の変位量を示す。鉄カラーで外周部を覆われたコイルは X 軸(横)方向の動きが拘束されるため、電磁力によって、Y 軸(縦)方向に変形し、コイルと鉄カラーの間に空間が生じる。また、マグネットの変位が左右非対称となっているのは、計算時における拘束条件の影響である。

Fig.3 に、マグネット中心磁場 3 T 時におけるマグネット内部の応力分布を示す。コイルに生じる電磁力によって、鉄カラーの最内側(Fig.1 において、鉄カラーがコイルと接触している部分)に応力が集中しているが、鉄カラーに生じた最大応力は許容応力を大きく下回る値であるため、構造上、健全なマグネット設計であると考えられる。

謝辞

本研究を進めるにあたり、貴重な助言を下された株式会社東芝(京浜事業所)の折笠朝文氏に感謝致します。

本研究は、文科省科学研究費補助金(若手研究B)の助成を得て行ったものである。

参考文献

1. T. Obana, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 82 (2010) p.158

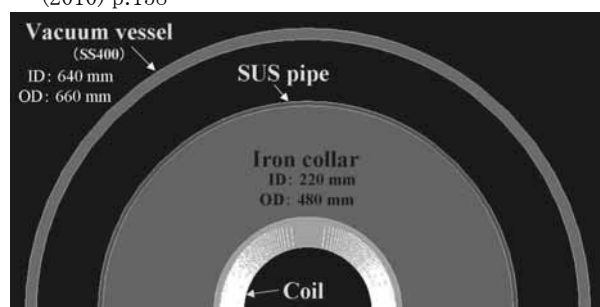


Fig.1 Cross-section of the superconducting dipole magnet for the rotating gantry.

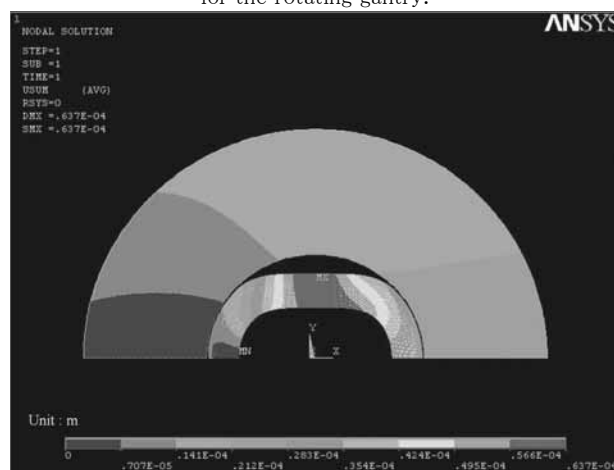


Fig.2 Displacement in the cross-section of the superconducting dipole magnet.

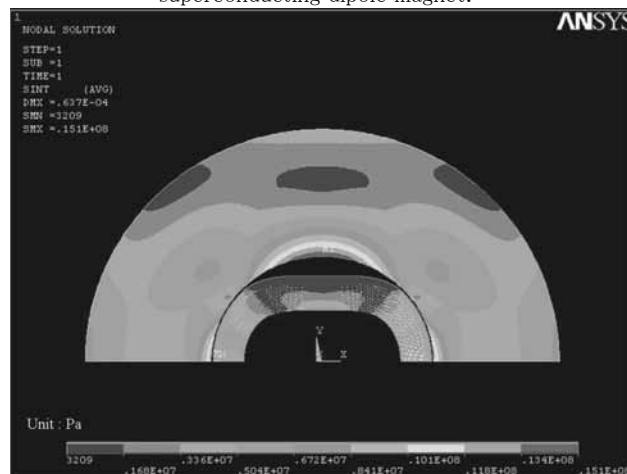


Fig.3 Stress distribution in the cross-section of the superconducting dipole magnet.

Y 系 HTS コイルのターン間電圧の測定 Measurement of Voltages between Turns in YBCO HTS Coil

駒込 敏弘, 李 潤錫, 仲村 直子, 玉田 紀治(前川); 古瀬 充穂, 岡野 眞, 淵野 修一郎, 山崎 裕文(産総研)
 KOMAGOME Toshihiro, LEE Yoonseok, NAKAMURA Naoko, TAMADA Noriharu(MAYEKAWA)
 ; FURUSE Mitsuho, OKANO Makoto, FUCHINO Shuichiro, YAMASAKI Hirofumi(AIST)
 E-mail: toshihiro-komagome@mayekawa.co.jp

1. はじめに

高温超電導コイルの設計製作においては、線材の臨界電流(以下 I_c と表記)特性の磁場異方性を考慮する必要がある。これまでの、コイル内部のテープ面垂直方向の磁界が最大となる箇所、高温超電導線材の I_c が最も低くなることから、短尺試料の I_c 特性よりコイルの I_c を簡単に概算することができた。一方、最近のイットリウム系高温超電導線材には垂直磁界に対する I_c の低下を抑制した種類もあり[1]、コイルの垂直磁界最大部で I_c が最小にならない場合も出てきた。これらの線材を用いたコイルの I_c 特性を見積もるには、コイル内の線材が経験する磁場の大きさと角度から、通電時に線材に発生する電圧分布を求める必要があると考えられる。電圧分布は後述する n 値モデルの式により I_c 分布との対応が可能である。

本研究ではコイル I_c 見積り手法の妥当性を確認するため、一定の間隔で電圧端子を設けたコイルを試作し、内部の I_c 分布を測定した。測定結果を、磁界分布と短尺試料の臨界電流特性から求めたコイル内の I_c 分布と比較した。

2. 試作コイルによる I_c 分布測定

線材とコイルの諸元を Table1 に示す。製作コイル(Fig.1)は無含浸で、超電導層を内側とし、ポリイミドテープを共巻きた。コイルの各ターンに銅箔を挟みこみ電圧計測を行う端子とした。銅箔は一端を超電導層側に挟み込み、一端を信号線にはんだ接続した。銅箔に接した線材の歪み劣化とコイルの変形を抑えるため、銅箔厚みは $10\ \mu\text{m}$ とした。

コイルを液体窒素浸漬にて通電を行い、コイル全体の I-V 特性および、各ターン間の I-V 特性を取得した。コイル I_c は 73A 前後、 n 値は 33 程度であった(基準電界: $1\ \mu\text{V}/\text{cm}$)。銅箔型電圧端子で計測した各ターンの I-E カーブを Fig.2 に示す。コイル内側のターンから 1st, 2nd, ... と表示している。これより求めた各ターンの臨界電流値 $I_{c,Turn}$ を Fig.3 白丸に示す。

3. コイル内 I_c 分布の数値解析

コイル臨界電流値 $I_{c,Coil}$ を、以下の手順で見積もった。

①コイルに用いる短尺線の臨界電流密度 J_c の磁場依存性を誘導法試験により取得した(Fig.4(a))。これにより、任意の外部磁場に置かれた線材の I_c を計算できる。

②コイル内部の磁界分布を解析した(Fig.4(b))。経験磁界はターン毎に異なり、各ターンでも幅方向で異なる。磁界は各々のターンにおいて、幅方向に 10 箇所計算した。コイル形状は軸対称なので、磁界分布も軸対称とした。

③コイル各ターンの I-V 特性及び、コイル全体の I_c 特性を計算した。各ターンにおける臨界電流値 $I_{c,Turn}$ と n 値を①、②の結果から求め(Fig.3 黒丸)、発生電圧 V を n 値モデルの式 $V = V_0 (I/I_c)^n$ から計算した (V_0 : 基準電圧, I : 通電電流)。

$I_{c,Coil}$ は、各ターンの電圧を積算したコイル全電圧が基準電圧に達した時の電流とした。 $I_{c,Coil} = 77\text{A}$ 程度と計算された。

Fig.3 に試験結果と解析結果の $I_{c,Turn}$ の比較を示す。両者は内周側から外周側に向かって I_c が上昇し、7 巻目周辺で $I_{c,Turn}$ が最大となっており、比較的良く一致した。

参考文献

1. H. Yamasaki, et al.: "Magnetic-field angle dependent J_c and flux pinning in commercial MOCVD-(RE)BCO tapes in a wide temperature range", Abstracts of CSJ Conference, 2010 3A-a09

Table 1 Specification of HTS tape and coil.

Tape width	4 mm	Inner diameter	74mm
Tape thickness	0.1mm	Outer diameter	77mm
Min. I_c @77K, 0T	97A	Height	10mm
n value	35~40	Number of turns	9.75×2

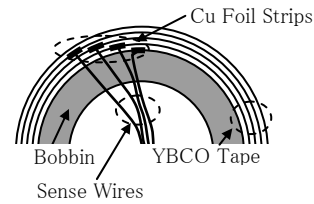


Fig.1 Schematic diagram of YBCO HTS coil structure.

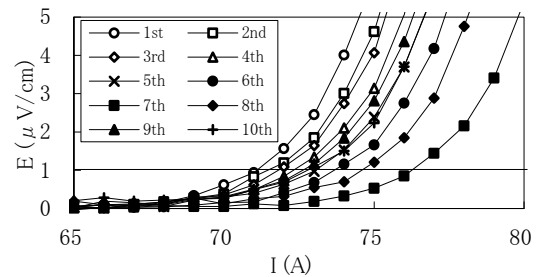


Fig.2 Inter-turn I-E Characteristics of YBCO HTS Coil (77K). Turns are numbered in ascending order from inside.

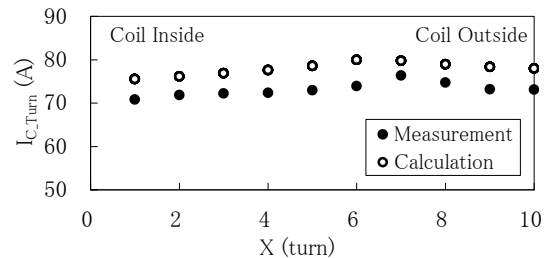


Fig.3 I_c distribution over turns. Calculated and measured I_c are plotted against turns.

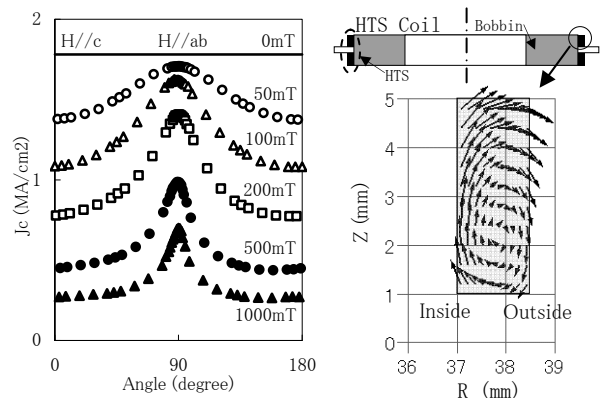


Fig.4 Magnetic-field angle dependence of J_c for YBCO tape (a) and magnetic-field distribution in the coil (b). The coil is located between $R=37$ to $38.5\ \text{mm}$, and $Z=1$ to $5\ \text{mm}$.

高温超伝導線材を用いた直流コイルの通電損失測定と解析

Charging loss measurement and numerical simulation for DC HTS coils

胡 瑞鑫, 高尾 智明(上智大学); 柳澤 吉紀, 中込 秀樹(千葉大学), 高橋 雅人, 前田 秀明(理化学研究所)
 HU Ruxin, TAKAO Tomoaki(Sophia University); YANAGISAWA Yoshinori, NAKAGOME Hideki(Chiba University);
 TAKAHASHI Masato, MAEDA Hideaki(RIKEN)
 E-mail: ruixin6514@ssbc.riken.jp

1. はじめに

全 HTS コイルを NMR に用いる場合、HTS コイルの体積が大きく励磁損失が過大になる可能性があるため、励磁損失を正確に見積もる必要がある。この観点から、HTS コイルの励磁損失の正確な解析手法を構築した。HTS コイルに生じる遮蔽電流による励磁損失を解析する場合、遮蔽電流が作る局所磁場の効果を考慮しない解析手法(独立計算モデル)が多く用いられている。本報では、遮蔽電流による局所磁場の影響を考慮したより精密な数値解析手法(以下連立計算モデル)を構築し、従来の独立計算モデルの結果と比較した。併せて小型コイルによる実験結果と比較した。

2. 解析手法

解析手法は以下の手順で構成される[1]。数値解析ではコイルを同心円の超伝導リングの集合としてモデル化し、#1 から# M まで番号をつける(M はコイルの総ターン数)。径方向の磁場が誘導する周方向の遮蔽電流のみを考慮する。テープ線材の幅を $2a$ 、HTS 層の厚みを d とし、幅方向のみを $2N$ 個に離散化する。この HTS 層を超伝導ストリップとして考えると、 m ターン目の i 番目離散化点における電流密度 $J_{m,i}$ は以下の離散化式で表すことができる。[2]

$$J_{m,i}(t+\Delta t) = J_{m,i}(t) + \frac{2\pi\Delta t}{\mu_0 d} \sum_j K_{ij}^{-1} [E_{m,j}(t) + \nabla\phi_m(t) - y_j \dot{B}_{r,m}(t)]$$

$$(m=1, \dots, M; i=1, \dots, 2N) \quad (1)$$

ここで、 t : 時間、 Δt : 時間刻み幅、 μ_0 : 真空の透磁率、 $E_{m,j}$: m ターン目の j 番目離散化点における電界、 $\nabla\phi_m$: m ターン目におけるスカラーポテンシャル勾配(電源から供給される電圧に対応)、 y_j : j 番目の離散化点の座標、 $B_{r,m}$: 他の全ターンが m ターン目のテープに作る径方向磁場である。また K は磁場のソース点とフィールド点を結びつけるマトリクスである。独立計算モデルにおいては $B_{r,m}$ は均一な通電電流のみによって発生する径方向磁場として計算する。一方、連立計算モデルでは通電電流と遮蔽電流によって発生する径方向磁場を考慮する。全ターンについて式(1)を連立して解くことで全離散化ポイントにおける電流密度の経時変化が得られる。得られた電流密度を元に、磁束の時間変化によってコイルに誘導される電圧と電流から通電損失を求めた。

3. 解析結果と実験との比較

IBAD-MgO 法で製作された YBCO 線材(SuperPower 社製、SCS4050、77 K での I_c : 96 A)を用いて、3 個のダブルパンケーキコイルを製作し、直列に接続した[1]。巻枠は厚さ 3 mm の FRP 円筒である。YBCO 線材は、幅 4.1 mm、厚さ 0.1 mm で、ターン間はカプトンテープで絶縁した。コイルは内径 30 mm、外径 38 mm、高さ 27mm である。液体窒素中で直流電源を用いて 40 A から -40 A まで周期的に励消磁した。40A はコイル臨界電流の 80% の値である。

Fig. 1. に初回通電時のコイル電圧を示す。実験値(●)は、励磁直後 39 μ V で、その後徐々にコイル励磁電圧の 45 μ V に飽和する。初期の電圧変動は超伝導線材の反磁性により見掛けのインダクタンスが減少することにより生じる。連立計算モデル(□)の結果は、実験値とよく一致している。一方、独立計算モデル(▲)では、励磁直後の電圧は 24 μ V と低い。これは遮蔽電流による局所磁場を無視しているために、巻き線

内部の磁場を大きく見積もるためである。以上のように、独立計算モデルの解析結果は、実験値より大きい電圧値になる。

Fig. 2. に I_c で規格化したコイル電流値(I/I_c)とコイルの励磁損失を示す。励磁損失は、コイルの $\pm I$ (A) まで電流を通電した場合に 1 サイクルあたりに生じる損失である。実験値(●)では臨界電流付近までほぼ 3 乗則が成立している。連立計算モデルによる解析(□)では、実験結果と同様に 3 乗則が見られる。遮蔽電流による局所磁場の効果で、臨界電流付近まで full penetration 的な特性が支配的にならないために 3 乗則になると推測される。一方独立計算モデル(▲)では、隣接ターンの遮蔽電流磁場を考慮しないので、径方向磁場が実際より大きく見積もられ、full penetration となり、ほぼ 1 乗則が成立している。以上の結果から、連立計算モデルが実験結果を良く反映していることが明らかである。

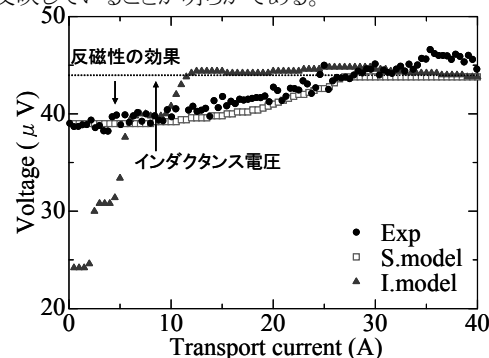


Fig. 1. Comparison of the coil voltages for the experimental result and simulation results based on a simultaneous model and an independent model respectively.

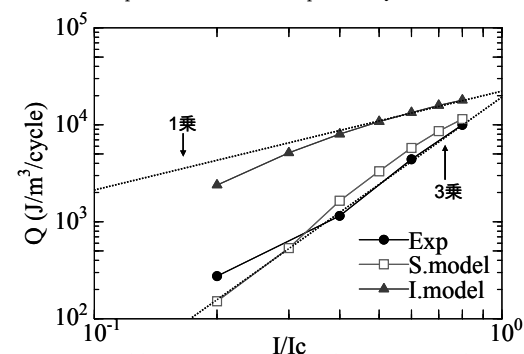


Fig. 2. Total losses per cycle of the YBCO coil as a function of the normalized transport current I/I_c .

4. まとめ

(1) HTS コイル励消磁における通電損失について、最適な解析モデルの検討を行なった。

(2) 各テープ間の遮蔽電流磁場の相互作用を考慮した連立計算モデルと、従来の各テープの交流損失を独立に足し合わせる独立計算モデルを比較した結果、連立計算モデルによる数値解析は、実験結果とよく一致した。

参考文献

1. Y. Yanagisawa et al.: IEEE Trans. on Applied Superconductivity., 20, 3, pp.744-747(2010)
2. E. H. Brandt: Phys Rev. B, 49, pp.9024-9040 (1994)

高 Ga 濃度 Cu-Ga 化合物粉末を経由して作製した V_3Ga 超伝導線材の組織観察

Microstructure of Fabrication Processing Using High Ga Content Cu-Ga Compound in V_3Ga Compound Superconducting Wire

村上 聡(富山大・学部生);松田 健二(富山大);水谷 学(富山大・院生);西村 克彦, 川畑 常真(富山大);
菱沼 良光(NIFS);池野 進(富山大)

SATOSHI Murakami, KENJI Matsuda, MANABU Mizutani, KATSUHIKO Nishimura, TOKIMASA Kawabata (Toyama University);
YOSHIMITSU Hishinuma (NIFS);SUSUMU Ikeno (Toyama University)

E-mail: ikenolab@eng.u-toyama.ac.jp

1. 緒言

国際熱核融合実験炉(ITER)計画以降の核融合実証(DEMO)炉や発電炉の先進核融合装置は、重水素とトリチウムの核融合反応を磁場による閉じ込めを行う核融合炉が前提となっており真空容器内では核燃焼プラズマとともに 14MeV の高エネルギー中性子が必ず生成し、各種ポートから透過や漏洩し、超伝導マグネットまで到達することが知られている。このため超伝導マグネット線材の放射化特性を考える上で、材料中の構成元素における誘導放射能減衰時間が重要である。我々は、Nb 金属よりも遥かに短い半減期を有している V 基化合物超伝導線材の中でも高磁界特性に実績を有する V_3Ga 化合物に注目している[1]。 V_3Ga は低放射化元素だけで構成されており、臨界温度や臨界磁界が Nb_3Sn とほぼ同等な超伝導特性を有しており、組織制御を行いさらなる特性の向上を目指している。今回、超伝導特性の向上を目的に Cu-Ga 固溶体の Ga 固溶限(20at.%)を超える高 Ga 濃度 Cu-Ga 化合物と V 金属母材を用いたパウダーインチューブ(Powder-In-Tube)法を新規線材化プロセスとして考案し、作製した超伝導線材の V_3Ga 超伝導相の特性や組織を調査したので、これらの結果について報告する。

2. 実験方法

30at.%, 50at.%Ga 濃度の Cu-Ga 化合物粉末を Ar 雰囲気中のタンマン溶解にて作製した。得られた化合物粉末を V 管(外径 10mm, 内径 6mm)に充填し、直径 1mm まで線材引きし、単芯線材を作製した。単芯線材を適当に切断し、19 本の単芯線材を再度 V 管に組み込み、直径 1mm まで加工することで 19 芯多芯線材を作製した。これらの工程で良好な加工性を示し、断線なく加工が終了した。作製した多芯線材を種々の条件で真空熱処理し、 V_3Ga 超伝導層を生成した。作製した 19 芯 Cu-30at.%Ga/V(以降 30%Ga 線材と称す)と、19 芯 Cu-50at.%Ga/V(以降 50%Ga 線材と称す)の組織観察用の試料は、走査型電子顕微鏡(SEM)観察は線材を U アロイに埋め込み、耐水研磨紙で 2000 目まで研磨後、3 μ m のアルミナ粒子を用いてバフ研磨を行い、表面を鏡面処理して作製し、透過型電子顕微鏡(TEM)観察は SEM 観察に用いた試料から日立製 FB-2100 集束イオンビーム加工装置(FIB)を用いて作製した。観察には SEM は Oxford Opal を備えた日立製 S-3500H、TEM はトプコン製 EM-002B を用いた。

3. 実験結果

Fig.1 に 50%Ga 線材の横断面の組織を SEM により観察し、EDS マップした結果を示す。EDS マップの結果から Cu-Ga コアからは Cu, Ga が、V 母相からは V が検出された。また、Fig.1 中の矢印に例示されるように、Cu-Ga コアと V 母相間に、V-Ga の反応相が存在することがわかった。この相を EDS により定量分析したところ V:Ga=3:1 となり、熱処理により V_3Ga 相が形成したことがわかった。図は省略するが、30%Ga 線材についても、同様の結果であった。30%Ga 線材、50%Ga 線材のフィラメントにおける V_3Ga 相の面積比を求めたところ、30%Ga 線材は 38%、50%Ga は 53%となり、Cu-Ga 化合物の Ga 濃度を

上昇させることで反応相の厚みが増加したと考えられた。Fig.2 に、50%Ga 線材の V-Ga 反応相を、FIB を用いて作製した TEM サンプルの全景を示す。図中に示した点線は Cu-Ga、V 母相と V-Ga 反応相の界面である。TEM により詳細に調査したところ、V 母相、V-Ga 反応相、Cu-Ga コアそれぞれの領域で異なったコントラストが得られた。V 母相付近の V-Ga 反応相は V 母相の結晶粒の長手方向に対して垂直方向に伸びた結晶粒であり、V-Ga 反応相/V 母相界面は比較的直線に近かった。Cu-Ga コア付近の V-Ga 反応相は粒状の結晶粒であり Cu-Ga コア/V-Ga 反応相界面は直線では無かった。また、V-Ga 反応相を EDX 分析したところ V:Ga が 3:1 となり、化学量論組成の V_3Ga 相が生成していることがわかった。そして、拡散相の制限視野回折図形が V_3Ga として指数付けができたことから、V-Ga 反応相はほぼ V_3Ga であると考えられた。

参考文献

- 1) Y.Hishinuma, A.Kikuchi, Y.Iijima, T.Takeuchi, A.Nishimura :J.Japan Inst. Metals, Vol.71 (2007) pp.959 - 965

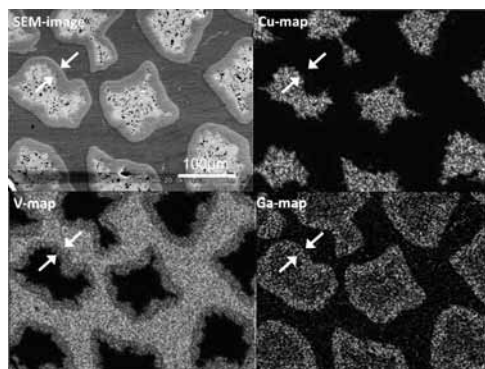


Fig.1 50%Ga 線材の横断面の SEM-EDS マップ結果

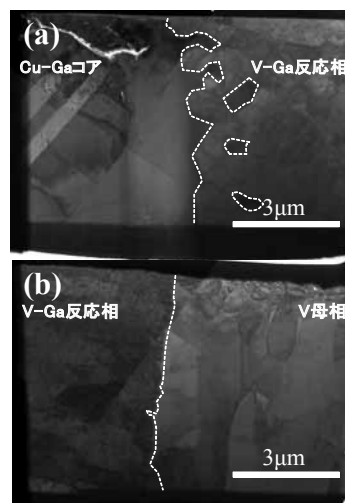


Fig.2 50%Ga 線材の (a)Cu-Ga コア-V-Ga 反応相、(b)V-Ga 反応相-V 母相界面の TEM 写真

中性子回折を用いた Nb₃Sn 線材の低温における歪み測定

Strain measurements by neutron diffraction on Nb₃Sn wires at low temperature

高橋 弘紀, 小黒 英俊, 淡路 智, 渡辺 和雄(東北大); 町屋 修太郎(大同大);
鈴木 裕士(原子力機構); 西島 元, 土屋 佳則(物材機構); 長村 光造(応科研)

TAKAHASHI Kohki, OGURO Hidetoshi, AWAJI Satoshi, WATANABE Kazuo (Tohoku Univ.); MACHIYA Shutaro (Daido Univ.);
SUZUKI Hiroshi (JAEA); NISHIJIMA Gen, TSUCHIYA Yoshinori (NIMS); OSAMURA Kozo (RIAS)
E-mail: kohki@imr.tohoku.ac.jp

1. はじめに

Nb₃Snは、現在実用超伝導線材として用いられている超伝導体の中で、最も歪み感受性の強い超伝導特性を示す物質である。したがって、Nb₃Sn 線材における超伝導特性の歪み依存性を理解することは、その応用上極めて重要である。近年、中性子線や高輝度放射光などの量子ビームの利用が身近になり、超伝導線材の内部歪みの研究が盛んになっている。我々のグループにおいてもこれまで、中性子回折を用いることでNb₃Sn 線材の内部歪みを3次元的に測定し、その超伝導特性の歪み依存性に対する理解を進めている[1-3]。また、前回の学会においては、室温における引っ張り応力下での内部歪みについての報告を行い、Nb₃Sn の回折弾性定数の異方性は非常に小さいこと等を示した[4]。

超伝導線材は極低温環境で使用されるため、低温における歪み測定は極めて重要である。そこで今回は、CuNb 補強 Nb₃Sn 線材の低温における内部歪みを測定するため、冷凍機と引っ張り試験機を組み合わせさせた装置を用いて、低温での引っ張り応力下での内部歪みを中性子回折を用いて測定したのでその結果を報告する。

2. 実験方法

測定に用いた線材は、φ1.0 mm の CuNb 補強ブロンズ法 Nb₃Sn 超伝導線材で、CuNb を超伝導コアの外側に配置したものである。内部歪み状態を変えるため、室温で 0.8% の曲げ歪みを両振りして5セット印加した線材 (PB) と熱処理直後の as-react 線材 (AR) それぞれ3本の端部を半田で治具に固定した試料を測定に用いた。中性子回折実験は日本原子力研究開発機構の JRR-3 ガイドホールに設置してある中性子応力測定装置 RESA を用い、低温 (7 K) において引っ張り荷重を印加しながら行った。低温用引っ張り試験機は、GM 冷凍機を真空容器上部に配置し、真空容器内の試料チャックをコールドヘッドと熱結合することで試料を冷却する構造となっている[5]。Fig. 1 に装置の外観を示す。試料の冷却は、冷却過程におけるロードセルのフリクションによる座屈を防ぐため、室温

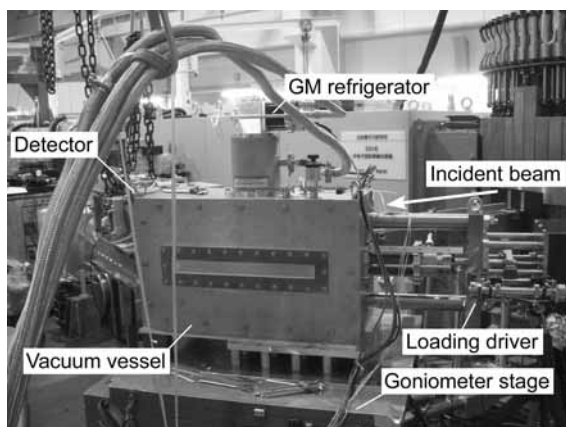


Fig. 1 Photo of the cryogenic load frame for neutron diffraction.

において 2 kgf の引っ張り荷重を印加した状態でを行った。

歪みの測定は Nb₃Sn の 321 回折ピークを用いて行い、歪みを算出する際の d_0 として、Nb₃Sn フィラメントをバナジウム管に詰めて測定した結果を利用した。

3. 結果と考察

Fig. 2 に AR 試料の引っ張り応力下での Nb₃Sn (321)面の格子定数の変化から求めた応力-歪み曲線を示す。線材の長手 (Axial) 方向においては圧縮の残留歪み、線材の横 (Lateral) 方向においては引っ張りの残留歪みであることが分かる。室温での結果と比べると、長手方向で 0.17% 圧縮側に、横方向で 0.14% 引っ張り側に移動している。特に横方向では室温では圧縮の残留歪みであったものが低温では引っ張り歪みとなっていることが分かった。長手方向の歪みは、中性子回折と同時に伸び計で測定した歪みとほぼ同じであった。また、横方向の歪みは長手方向の歪みに対して 0.35 の比率で圧縮側に変化しており、このことが超伝導特性の一軸歪み依存性に影響を与えていると考えられる。

当日は、事前曲げ処理を施した試料の結果を含め、超伝導特性の歪み依存性に対する解析結果も併せて報告する。

参考文献

1. S. Awaji, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 16 (2006) p. 1228
2. H. Oguro, et al.: J. Appl. Phys., Vol. 101 (2007) 103913
3. S. Awaji, et al.: Supercond. Sci. Technol. Vol. 23 (2010) 105010.
4. K. Takahashi, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 82 (2010) p.53
5. Y. Tsuchiya, et al.: Meas. Sci. Technol. Vol. 21 (2010) 025904

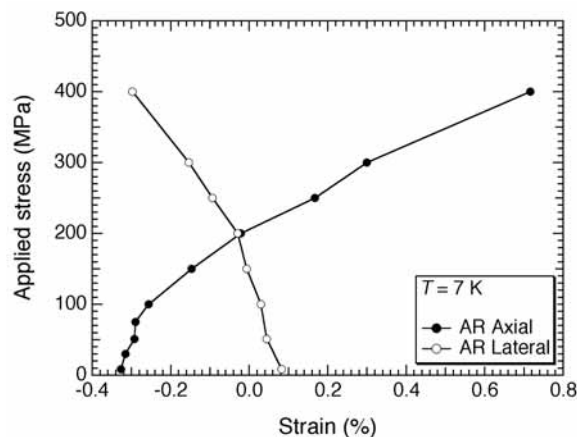


Fig. 2 Applied tensile stress-strain relation on (321) plane of Nb₃Sn for CuNb/Nb₃Sn wires bundle obtained by neutron diffraction measurements at 7 K.