

REBCO 超電導テープ線材の交流損失特性(3)

—フィラメント分割した人工ピン ZrO₂ 入り超電導テープ線材—

AC Loss of REBCO coated superconducting with filaments

—Artificial pinning centers doped GdBCO coated superconducting tapes with filaments—

中村 聡介、野上 広司、林 卓矢、岩熊 成卓、船木 和夫(九大);
齊藤 隆、飯島 康裕(フジクラ); 衣斐 颯、山田 穰、和泉 輝郎、塩原 融(SRL)

NAKAMURA Sosuke, NOGAMI Koji, HAYASHI Takuya, IWAKUMA Masataka, FUNAKI Kazuo (Kyushu Univ.);

SAITO Takashi, IJIMA Yasuhiro(Fujikura Ltd.); IBI Akira, YAMADA Yutaka, IZUMI Teruo, SHIOHARA Yuh (SRL)

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

1. はじめに

超伝導線材を電力機器に応用する場合、超伝導巻線部に発生する交流損失は機器の全熱負荷の大部分を占めるため、様々な温度での損失の見積もりが重要になる。我々はこれまで、YBCO テープ線材の交流損失特性を評価し、温度スケールリング則が成立することを確認している。

最近では、磁場中の臨界電流密度 J_c の向上のため、超伝導膜を生成する際の原料に不純物(BZO)を混入させる人工ピン導入方法が期待されている。さらに、スクライビング技術による線材細線加工により、損失低減可能であると示されている。

そこで本研究では、これらの技術が応用された人工ピン ZrO₂+GdBCO 超電導テープ線材をフィラメントに分割し更なる低交流損失を目指した試料に対して、鞍型ピックアップコイル法により交流損失を測定・評価、比較したので報告する。

2. 試料と測定法

試料は中間層に IBAD で生膜された GZO 基板に、PLD 法によって GdBCO 超伝導層を成膜させる際にターゲットに人工ピン ZrO₂ を混入させた GdBCO 線材をスクライビング技術により 5・10・20 分割したものである。

各層の構成を Fig.1 に示す。この短尺線材を 3 枚積層して、鞍型ピックアップコイル法により、冷凍機による伝導冷却で 35~77K の範囲で、磁化及び交流損失を測定した。磁界は試料幅広面に対して垂直に印加した。

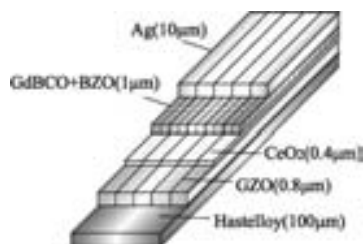


Fig.1 Artificial pinning centers doped GdBCO coated superconducting tapes with filaments

3. 実験結果

今回測定した 5 分割線材の交流損失の結果を Fig.2 に示す。これまでに測定してきた様々な種類の YBCO、GdBCO 線材の臨界電流特性 (I_c - B) は、各温度の零磁場の臨界電流 (以下、 $I_{c0}(0, T)$) で規格化することにより温度に関してスケールリングされ、また、交流損失も温度に関してスケールリングされることを確認している。

そこで、Fig.2 に示す交流損失に対しても、同様に横軸を $I_{c0}(0, T)$ 、横軸を $I_{c0}(0, T)$ の 2 乗値で規格化することで各温度の曲線が一つのマスターカーブに一致した [Fig.3]。さらに Fig.3 にはフィラメント分割の有用性を検証するために 10・20 分割し

た、同じ人工ピン ZrO₂+GdBCO 線材の交流損失をスケールリングしたものも示す。

4. まとめ

以上の結果より、今回の線材に対しても、これまで同様に温度スケールリング則が適用可能であることを示した。また、人工ピンを導入した線材に対しても、フィラメント分割することで交流損失を低減する事ができるとわかった。

5. 謝辞

本研究は、超伝導応用基板技術研究開発の一環として、ISTEC を通じて NEDO の委託を受けて実施しているものである。

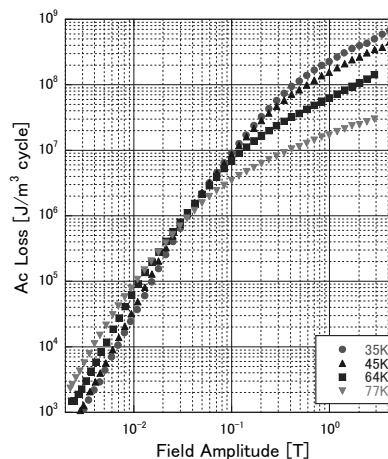


Fig.2 The ac loss of artificial pinning centers doped GdBCO coated superconducting tapes with 5 filaments

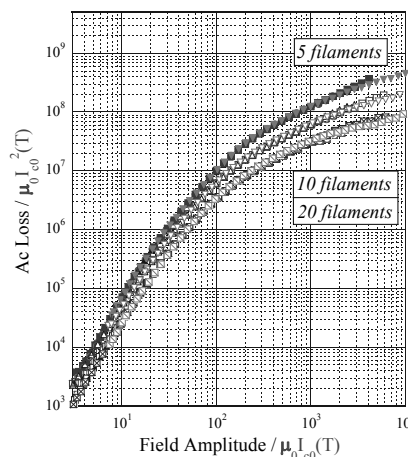


Fig.3 The normalized AC losses by $I_{c0}(0, T)$

IBAD-MgO の表面状態と CeO₂ キャップ層内配向度の関係Relation between surface state of IBAD-MgO and
in-plane grain alignment of CeO₂ cap layer

島山 英之, 吉積 正晃, 伊藤 岳文, 栗木 礼二, 高橋 貴彦, 山田 穰, 和泉 輝郎 (超電導工学研究所)

HATAKEYAMA Hideyuki, YOSHIZUMI Masateru, ITO Takefumi, KURIKI Reiji, TAKAHASHI Takahiko,

YAMADA Yutaka, IZUMI Teruo (SRL)

E-mail: h.hatakeyama@istec.or.jp

1. はじめに

近年開発された IBAD-MgO 基板は 1000 m/h もの高速で製造することが可能である。このため、我々は IBAD-MgO 基板を用いた薄膜線材の低コスト化製造技術開発を行っている。今回、中間層を従来の 4 層から 3 層に減らした CeO₂/IBAD-MgO/Gd-Zr-O/Hastelloy 構造 IBAD-MgO 基板において、MgO 層に加湿処理を施すことにより、CeO₂ 層の面内配向 $\Delta\phi$ が改善され、3.07° の高配向を得たので報告する。

2. 実験

IBAD-MgO 基板を IBAD-MgO 層まで成膜した段階で恒温恒湿器にて大気圧下、温度 20~35°C、相対湿度 0 or 90%の大気、窒素ガス、炭酸ガスの各雰囲気下に 10 分~120 分暴露させた。その後 PLD 法で CeO₂ 層を成膜し、X 線 pole figure により $\Delta\phi$ を評価した。同じ IBAD-MgO 層上に CeO₂ 成膜前に LMO 層を成膜した IBAD-MgO 基板を比較材として準備した。加湿処理前後の IBAD-MgO 層の表面状態の評価は AFM、XPS 等により行った。

3. 結果

図 1 に各 IBAD-MgO 基板における CeO₂ 層 $\Delta\phi$ と膜厚の関係を示す。IBAD-MgO 層に大気雰囲気下で加湿処理を行った基板において、CeO₂ 層が 500nm に達した時点で $\Delta\phi = 3.07^\circ$ を得た。この値は加湿処理を行わない基板では $\Delta\phi = 5.94^\circ$ であった。比較サンプルである LMO 層を挿入した 4 層構造 IBAD-MgO 基板でも $\Delta\phi = 3.91^\circ$ であり、これらの結果より加湿処理が配向度向上に寄与していることがわかった。また、相対湿度 90%の窒素ガス及び炭酸ガスの各雰囲気下で加湿処理を行った基板においても、CeO₂ 層が 500nm に達した時点で $\Delta\phi = 4.14^\circ$ 及び $\Delta\phi = 4.04^\circ$ を得た。比較とした相対湿度 0%の窒素ガス及び炭酸ガスの各雰囲気下に暴露した基板では $\Delta\phi = 8.27^\circ$ 及び $\Delta\phi = 12.27^\circ$ となり、雰囲気中の水蒸気が CeO₂ 層の面内配向を改善するために必要であることがわかった。これらの加湿処理の温度と時間は各雰囲気下で異なっており、表面改質の温度及び時間依存性については熱力学的考察を加えて当日発表する。

図 2 に大気雰囲気下での加湿処理前後の AFM 測定結果を示す。加湿により突起が増加しているが、算術平均粗さ (Ra)及び最大高さ荒さ(Rz)はほぼ等しい値となった。

また XPS 測定により、大気雰囲気下での加湿処理によって Mg(OH)₂ 等の反応物が MgO 層表面に増加していることが確認された。LaMnO₃ や Mg(OH)₂ 等により IBAD-MgO 層の表面状態を変えることは、その上に成膜される CeO₂ 層の面内配向度に大きな影響を与えることがわかった。

4. まとめ

3 層構造 IBAD-MgO 基板において、MgO 層への加湿処理により CeO₂ 層の $\Delta\phi$ を向上させることができた。その結果、CeO₂/IBAD-MgO/Gd-Zr-O/Hastelloy 3 層構造 IBAD-MgO 基板において $\Delta\phi = 3.07$ を達成した。相対湿度 0%の窒素ガス、炭酸ガスを用いた実験により、MgO 層表面に H₂O を供給する加湿処理が CeO₂ 層の面内配向の改善に有効であることがわかった。今後、超電導層の成膜を進めると共に表面状態の超電導特性・機械特性等に対する影響を調査する。

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研究として、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託を受けて実施したものである。

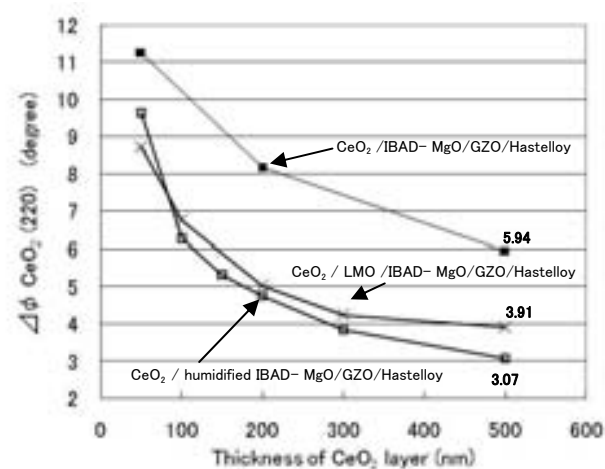
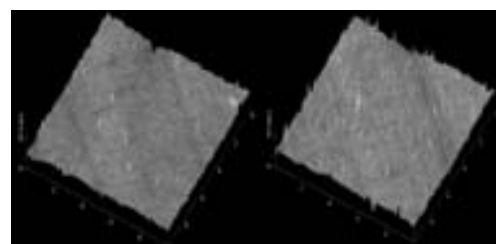


Fig. 1 Thickness dependences of in-plane grain alignment ($\Delta\phi$) of CeO₂ layers for 3-4 layered IBAD-MgO substrate



	As-deposited MgO	Humidified MgO
Ra(nm)	1.50	1.48
Rz(nm)	27.3	28.0

Fig. 2 AFM images of MgO surface

RF-Sputter 法による Re-123 系線材用 CeO_2 中間層の開発 (4)

— 量産検討と IBAD-MgO 基板上の成膜検討 —

Development of CeO_2 buffer layer for coated conductors by RF-Sputtering (4)

中西 達尚, 小泉 勉, 青木 裕治, 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, AOKI Yuji, 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

昭和電線は、NEDO の「Y 系超電導電力機器技術開発」プロジェクトにおいて 275kV 高電圧電力ケーブル (ISTEC 殿主管) と変圧器 (九電殿主管) の開発に線材提供を行っている。この提供用線材に使用するため、スパッタプロセスによる CeO_2 中間層の長尺成膜を検討している。IBAD-GZO/Hastelloy™ 基板上において 200m 級の量産を行っており、H21 年度の計画提供量の製造を完了した。更なる低コスト線材の基板として期待される IBAD-MgO/Hastelloy™ 基板を用いたスパッタプロセスによる検討は、短尺で 300A/cm-width の特性が得られており、現在は長尺基板上で成膜条件の確立を行っている。

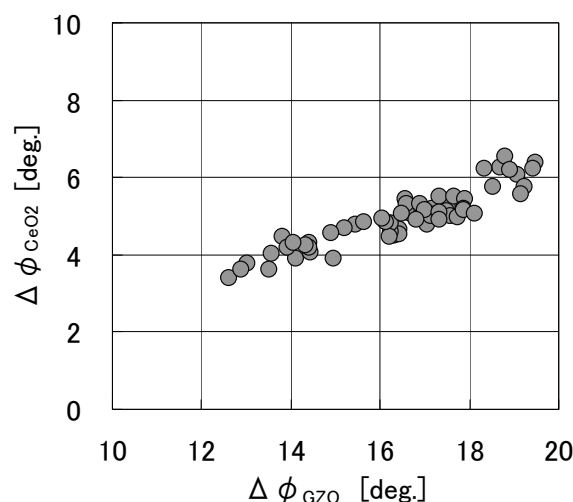
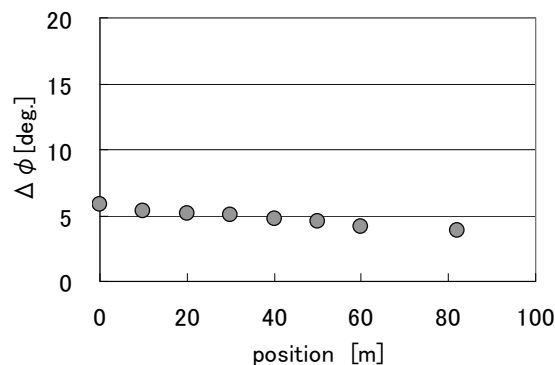
2. 実験方法

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-GZO/Hastelloy™ 基板は、(株)フジクラ殿より供給頂き、IBAD-MgO/Hastelloy™ 基板は主に SRL 殿より供給頂き、MgO 層の上に LaMnO_4 をキャップ層として形成したものをを使用した。IBAD-MgO 基板上の成膜条件検討では、設定温度は 600~800°C、RF 投入電力は ~1kW、ガス圧力は、~30mTorr とした。線材移動速度は ~10m/h で検討を行った。 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

2009 年度に IBAD-GZO/Hastelloy™ 基板上に成膜した長尺 (100~200m) 線材の両端から切り出して評価した基板の $\Delta\phi_{\text{GZO}}$ に対する CeO_2 中間層の $\Delta\phi_{\text{CeO}_2}$ を Fig.1 に示す。 $\Delta\phi_{\text{GZO}} < 18^\circ$ において、 $\Delta\phi_{\text{CeO}_2} < 6^\circ$ が得られている。現装置では、10mm 幅基板で年間約 5km の成膜が可能である。

Fig.2 に IBAD-MgO 基板への SRL 殿より提供された 80m 基板上に作製した CeO_2 中間層の面内配向性 ($\Delta\phi$) を示す。 CeO_2 膜の $\Delta\phi$ は全長にわたり 6° 以下が得られた (SRL 殿) 詳細は、当日報告する。

Fig.1 $\Delta\phi_{\text{CeO}_2}$ in relation to $\Delta\phi_{\text{GZO}}$ of each tape.Fig.2 Longitudinal $\Delta\phi$ distribution of CeO_2 buffer layer on LMO/IBAD-MgO.

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。

スライスした超伝導バルク板の捕捉磁場分布特性

Trapped field profiles on the sliced superconducting bulks magnetized by pulsed field

古田 大樹、三浦 崇、荒屋敷 貴大、菊池 康晃、内藤 智之、藤代 博之(岩手大工)、柳 陽介、伊藤 佳孝(イムラ材研)

FURUTA Daiki, MIURA Takashi, ARAYASHIKI Takahiro, KIKUCHI Yasuaki, NAITO Tomoyuki,

FUJISHIRO Hiroyuki, (Iwate Univ.) YANAGI Yousuke, ITOH Yoshitaka (IMRA Material R&D Co.,Ltd.)

E-mail: furuta0429@yahoo.co.jp

1. はじめに

超伝導バルクはその成長機構に起因したピン止め中心の不均一が存在し、ピン止め力の ab 面内分布は捕捉磁場分布や Magnetoscan 法などで評価できる。しかし、厚さ(c 軸)方向のピン止め力の不均一は、微小試料を切り出して磁化測定を行う以外に評価する手法は無く、捕捉磁場特性としてもこれまで調べられていなかった。前回の学会で直径 45mm、厚さ 19.5mm の Gd 系超伝導バルクを厚さ方向に 3 枚にスライスし、各スライス板の捕捉磁場分布が厚さ方向に変化していることを報告した[1]。本研究では、これらのスライスした超伝導バルク板を重ねることによる捕捉磁場分布特性の変化、および Magnetoscan 法[2]による臨界電流密度(J_c)分布と捕捉磁場分布の比較について報告する。また、薄板状バルクのパルス着磁による捕捉磁場と温度変化のシミュレーション解析の結果も併せて報告する。

2. 実験方法

SRL-ISTEC で作製した Gd 系超伝導バルク(45mm ϕ ×19.5mm、 $B_{1FCM}=1.8T$ at 77K)を厚さ方向に 3 枚にスライスし、厚さ 5mm のスライス板を上部からそれぞれ Bulk-1, Bulk-2, Bulk-3 とする。各スライス板は $T_s=40\sim 60K$ に真空容器中で伝導冷却され、ソレノイド型パルスコイルを用いて、印加磁場 $B_{ex}=2.0\sim 5.8T$ の範囲で 3 回の同一パルス着磁(SPA)を行った。パルス着磁後の捕捉磁場分布はバルク表面から 1.0mm 上方にホールセンサを走査させて測定をした。

3. 結果と考察

Fig.1 に $T_s=60K$ におけるバルク中心での捕捉磁場の印加磁場依存性を示す。1 枚の結果(Bulk-1, Bulk-2, Bulk-3)と比較すると 2 枚重ね(Bulk-1,2)、3 枚重ね(Bulk-1,2,3)と厚くなるに従い、中心に磁束が捕捉され始める印加磁場 $B_{ex}(\text{initial})$ は高磁場側にシフトし、バルクの厚さの増加とともに磁場が侵入しにくくなっていることが分かる。シミュレーション結果からも定性的に実験結果を説明できる。

Fig.2 に Bulk-1 に $T_s=60K$ において比較的弱いパルス磁場($B_{ex}=3.2 T$)を印加した時の捕捉磁場分布(上)と Magnetoscan 法を用いた 77K における相対的な J_c 分布(下)を示す[3]。Magnetoscan 信号が大きい部分は相対的に J_c が小さく、信号が小さい部分は相対的に J_c が大きいことを示す。バルクの表面層内に J_c の分布があることが推測され、さらに弱いパルス磁場で磁束の捕捉されている部分

と対応していることが明らかになった。Magnetoscan 信号は表面層 0.1~1mm 以内の領域の情報であり、今後更にバルクを薄くして捕捉磁場と J_c 分布の関係を検討する必要がある。

参考文献

[1] T Miura, et al. Abstracts of CSJ Conference, Vol.81 (2009)

[1P-p10]

[2] M Eisterer et al. Supercond. Sci. Technol.16 (2003) p.1282

[3] Y Kikuchi et al. J. Cryo. Soc. Jpn, Vol.82 (2010) [1A-a08]

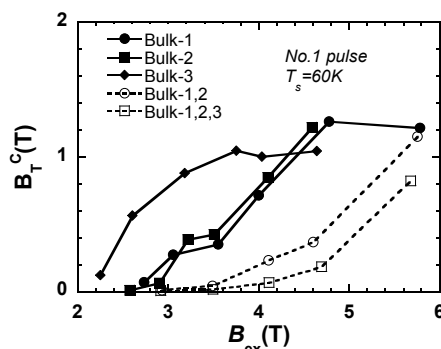


Fig.1 The applied field B_{ex} dependence of the trapped fields B_T at 60K.

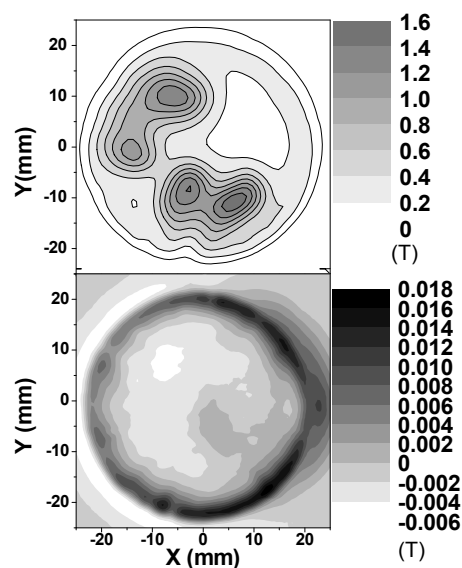


Fig.2 Trapped field distribution at 60K (upper) and critical current density distribution at 77K (lower).

超伝導二本転位並列導体の巻き乱れによる付加的交流損失に関する検討

The examination of an additional AC loss caused by two parallel SC conductors with rolling disorder

渋田 寛, 林田 昌之, 岩熊 成卓, 船木 和夫(九州大学)

林 秀美, 岡元 洋(九州電力);

藤原 昇, 五所 嘉宏, 和泉 輝郎, 塩原 融(ISTEC)

Email:shibuta@sc.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

我々は大電流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 N 巻きのコイルの途中で巻き乱れが起こり 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、巻き乱れが左側で転位位置から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。その他に右側の巻き乱れの位置を変更し、1 巻き目で発生し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、左側の巻き乱れの位置を 25 巻き目で固定し、右側の巻き乱れの位置により付加的交流損失がどのように変化するかについても考察した。対称性より右側も 25 巻き目で巻き乱れが発生した場合が一番付加的交流損失は小さくなるが、コイルの終端よりも転位位置に近い方が、巻き乱れによる付加的交流損失は小さくなるということが分かった。

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。

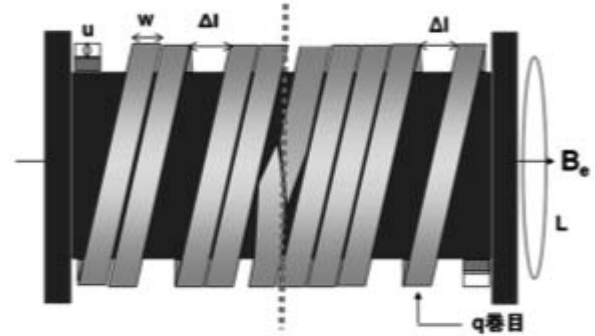


Fig.1 Transposed parallel SC

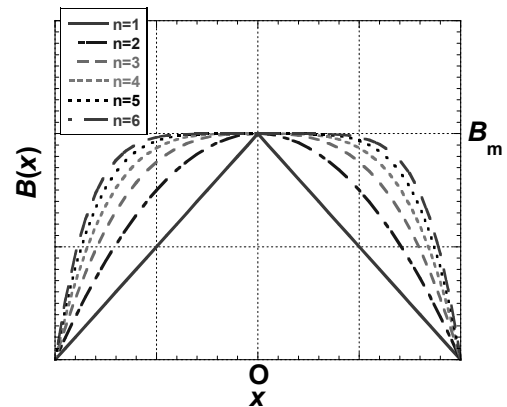


Fig.2 Magnetic field distribution

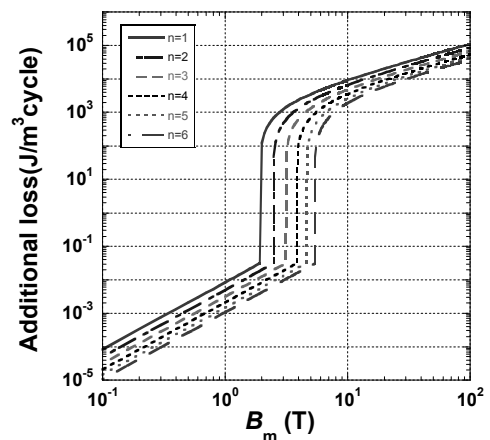


Fig.3 The gap of rolling disorder dependences of the Additional loss

YBCO超伝導並列導体をパンケーキコイルに巻いた際の電流分流特性

Study on the current sharing properties of YBCO superconducting parallel conductors wound into pancake coil

高山 洗, 富岡 章, 岩熊 成卓(九州大学);

林 秀美, 岡元 洋(九州電力);

藤原 昇, 五所 嘉宏, 和泉 輝郎, 塩原 融 (ISTEC);

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

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

FUJIWARA Noboru, GOSHO Yoshihiro, IZUMI Teruo, SHIOHARA Yuh (ISTEC)

E-mail: takayama@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、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考案した、電流分流比を最も均一にする転位方法についての考察を行ったので報告する。

2. 転位方法

これまで4本並列導体をパンケーキコイルに適用する際に、シングルパンケーキコイル間で転位を施し電流分流比の均一化を図った。そこで今回はより機器に使用されるダブルパンケーキコイルの転位方法について検討を行った。パンケーキコイルはその形状上、パンケーキコイル間においてのみ、転位を行うことができる。これまでの研究で並列導体をコイル状に巻く際、素線が対称となるように転位を施すことで電流分流比を均一にできるということがわかっているためそれらを応用し、転位を施した。計算した電流分流比のダブルパンケーキコイル枚数依存性の結果を Fig.1 に示す。

3. コイル形状変化に対する依存性

考案した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の変化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。

4. 巻き乱れに対する分流比の変化

実際に並列導体をパンケーキコイル状に巻くと、巻き乱れが生じる可能性がある。そこで、ダブルパンケーキコイルのある一枚のみ巻き乱れが生じたと仮定し、電流分流比を計算した。その場合のコイル内径依存性の結果を Fig.2 に記す。

5. 考察

今回提案した転位方法により、ダブルパンケーキコイルにおいても電流分流比を均等にできることがわかった。またその形状が大きくなるほど電流分流比が均一に近づく特性があることがわかった。これはシングルパンケーキコイル間の転位と同様の結果となった。ダブルパンケーキコイルに対しても有効であるこの転位方法は機器応用へと用いることが出来る。

6. 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。

参考文献

- [1] 香月良太 他 : 2008年度春季低温工学・超伝導学会講演 概要修 p. 178

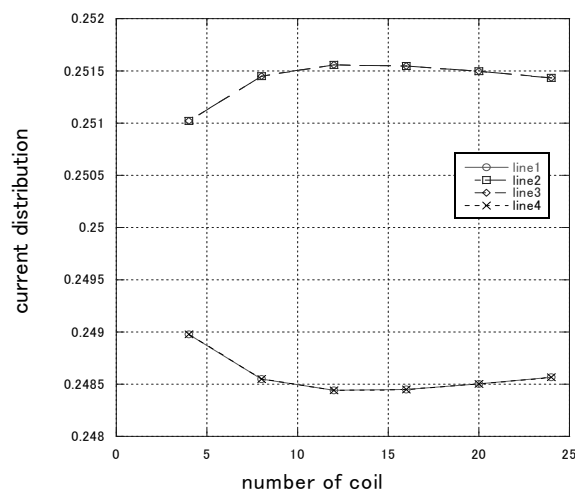


Fig.1 The current distribution in a 4-strands parallel conductor

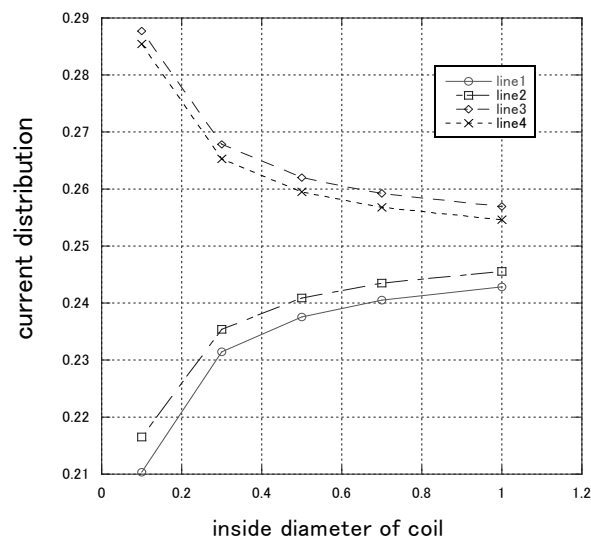


Fig.2 The current distribution in a 4-strands parallel conductor with a winding pitch disorder

RE 系超電導線材の小型パンケーキコイルの通電特性

Characteristics of the pancake coils using REBCO coated conductor

大保 雅載, 藤田 真司, 原口 正志, 飯島 康裕, 斉藤 隆(フジクラ)

DAIBO Masanori, FUJITA Shinji, HARAGUCHI Masashi, IJIMA Yasuhiro, SAITO Takashi (Fujikura Ltd.)

E-mail:mdaibo@fujikura.co.jp

1. はじめに

RE 系超電導線材(RE は希土類)はここ数年で飛躍的に特性が向上しており、応用機器開発の検討も進みつつある。フジクラでは RE 系超電導線材の開発を行っているが、より高特性の超電導線材開発のためには線材の機械特性、コイルの通電特性などを把握しておく必要がある。

今回、低コスト線材として適用が期待される IBAD-MgO 基板超電導線材について小型パンケーキコイルを試作し通電特性を評価したので、その結果を報告する。

2. パンケーキコイル巻線

今回の実験に使用した線材の諸元を Table.1 に示す。0.1mm 厚の Hastelloy 基板に IBAD 法によって MgO 中間層を形成し、PLD 法で超電導層(GdBCO)を形成した。その後、安定化層として銀をスパッタリングし、半田により 0.1mm の銅を貼り合わせた。準備した線材を FRP 製の巻枠に巻線し Table.2 のようなシングルパンケーキを 2 個作製し、これら 2 個のパンケーキを積層した。

3. 通電試験結果(液体窒素中)

2 個のパンケーキコイルを積層した後に液体窒素中で通電試験を実施した。試験結果を Fig.1 に示す。 1×10^{-6} V/cm で定義した積層コイルの臨界電流は 98A であり、各コイルの臨界電流は、コイル#1:102A、コイル#2:98A であった。また、両対数プロットにより $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-7}$ V/cm で算出した n 値はいずれも 20 以上でありコイルが健全であることを確認した。

4. 伝導冷却試験結果

2 個のパンケーキコイルを積層したコイルを無酸素銅の冷却板で挟んで GM 冷凍機による伝導冷却下で通電試験を実施した。積層コイルにはホールセンサーを配置してコイル中心磁場の測定も行った。各温度でのコイル臨界電流の測定結果を Fig.2 に示す。また、コイル臨界電流と中心磁場については Fig.1 のロードライン計算値と一致していることを確認した。

Table 1 Specifications of REBCO tape

Type	Cu(0.1mm)/Ag/GdBCO(PLD)/MgO(IBAD)/Hastelloy(0.1mm)
Insulation	Double polyimide tapes wrapping
Thickness	0.2mm
Width	5mm
Ic @77K, 0T	184~212A

Table 2 Specifications of REBCO single pancake coils

Coil	#1	#2
Inner diameter	70mm	70mm
Outer diameter	99.7mm	99.7mm
Turns	36	36
Length of tapes	10m	10m

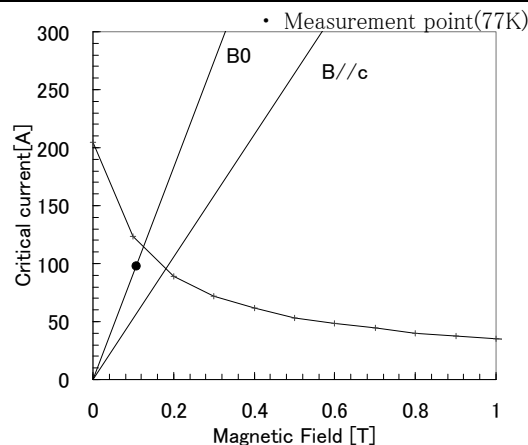


Fig.1 Loadline of pancake coils

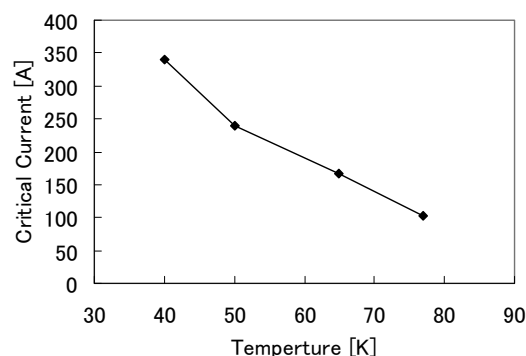


Fig.2 Temperature dependence of Ic for pancake coil

Cu メッキ実用 RE123 系線材とコイル化の検討

Cu stabilized RE123 coated conductor and its coil

本間 久雄, 山田 穰, 藤原 昇, 和泉 輝郎, 塩原 融 (SRL); 岩熊 成卓 (九大); 大松 一也 (SEI)
 HOMMA Hisao, YAMADA Yutaka, FUJIWARA Noboru, IZUMI Teruo, SHIOHARA Yuh (SRL);
 IWAKUMA Masataka (Kyushu Univ); OHMATSU Kazuya (SEI)
 E-mail: h-homma@istec.or.jp

1. はじめに: Y 系線材の長尺量産化は日米の各社により着々と進められている。しかしながら、機器へ応用していく上では、まだ、種々の課題が残っている。例えば、機器応用では、大電流通電が想定され、クエンチ防止に Cu などの安定化材が必要である。今回、Cu メッキ厚を変えた線材を試作し、その臨界電流 I_c 、n 値への影響を検討した。次に、この Cu メッキ線材を長尺化しパンケーキコイルを作製し、臨界電流と n 値に関する影響を検討した。更に、そのパンケーキコイルを用いて冷凍機冷却下での励磁試験を行い熱暴走が発生する電流を検討した。以下に詳細を報告する。

2. 試料及び評価方法: 1) Cu メッキ厚の I_c 、n 値への影響: 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 で構成した臨界電流 500~600A/cm-w (@ 77K, 0T) の線材をレーザーにより幅 5mm に切断し、その後、10, 20, 30, 50, 100 μ m の厚みで Cu メッキを行ない、77K, 0T 中で I_c 、n 値を測定した。

2) コイル化: 上記構造で GdBCO 超電導層 1.7 μ m、Ag スパッタ層 10 μ m、Cu メッキ 30 μ m で臨界電流が 220~260A/cm-w (@ 77K, 0T) の長尺 50m 線材を作製し、内径 80mm、外径 153mm、高さ 6mm、巻き数 134 ターンのコイルを作製し、77K, 0T 中で I_c 、n 値の測定を行った。次に、GM 冷凍機による伝導冷却で温度 60K にてコイルの熱暴走電流 I_{tr} [1] を測定した。この際、通電電流を一定時間保持してコイル両端電圧が上昇する電流を熱暴走電流 I_{tr} とした。

3. 結果: Fig.1 に短尺試料を用いて Cu メッキ厚と臨界電流、n 値を検討した結果を示す。線材は 5mm 幅であるが、図には 1cm 幅換算の I_c を示す。いずれも、 I_c 、n 値に多少の分布が見られるが、いずれの場合も明確な劣化は見られなかった。Cu メッキ 30 μ m 厚の 50m 級線材の試作を行なった。

この 50m 線材を用いて、Fig.2 のエポキシ含浸したシングルパンケーキコイルを作製した。77K での励磁試験では 69A (0.26T) を流すことができたが、これは、線材の I_c -B 特性から算出した自己磁場によるコイル I_c の 62A に概ね合致していた。また、n 値も 31 と線材作製時の値を維持していた。すなわち、巻き線、含浸による劣化がないことがわかった。

Fig.3. にこのコイルを伝導冷却により 60K に冷却し、熱暴走試験を行った結果を示す。コイル I_c 近傍で段階的に通電電流を増加して行き、コイル電圧の時間変化を観測した。熱暴走電流以下では、冷凍機冷却によりコイルは 60K に維持されたが、電流値 161A では、この電流値を維持した状態でもコイル両端の電圧が増大していき、温度上昇による熱暴走を確認した。この時のコイル両端電圧は 0.9mV 近傍であり、線材長で単純に平均した発生電界は 0.18 V/cm であった。これは、一般的な線材の I_c の 1 V/cm よりも小さい値である。現在、コイル内部の詳細な磁界分布を計算しつつあり、今後、線材 I_c と比較検討する予定である。

4. まとめ: 1) I_c が 500~600A 級の Y 系線材に 100 μ m 厚まで Cu メッキ処理しても I_c 、n 値に明確な劣化は見られず、実用的に使えることがわかった。

2) I_c が 220~260A 級で長尺 50m の Y 系線材に Cu メッキ 30 μ m を施し、内径 80mm、外径 153mm のエポキシコイルを作製した結果、線材の劣化なく、含浸、巻き線できた。

3) 60K において、冷凍機冷却による熱暴走試験を行い、Y 系コイルがほぼ線材 I_c 近傍の電流値まで熱暴走なしに通電できることを確認した。

5. 謝辞: ISTEC 町氏には線材切断、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、「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。

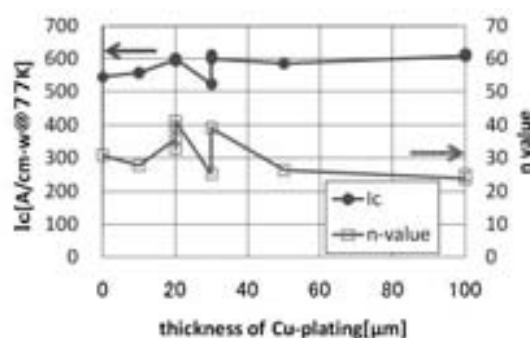


Fig.1 Relationship between thickness of Cu-plating and critical current and n-value at 77K, 0T.



Fig.2 GdBCO-coil with epoxy impregnation. (inner diameter: 80mm, outer diameter: 153mm, height: 6mm)

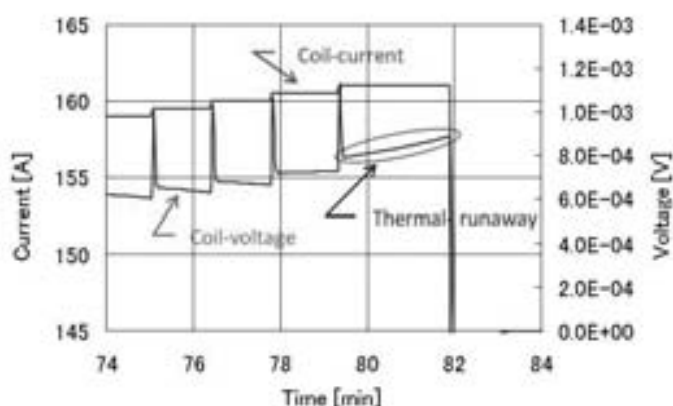


Fig. 3 Thermal-runaway test by refrigerator cooling at 60K

参考文献: 1.K. Tasaki, et al.: "Thermal Stability of Conduction-cooled HTS Coils- Thermal Runaway Evaluation Tests -" TEION KOGAKU 40(2005) p.404-411, p.412-419.

SMES 用伝導冷却高温超電導コイルのクエンチ保護 Quench protection of conduction cooled HTS coil for SMES

室町 和輝, 鈴木 貴裕, 青木 佳明, 植田 浩史, 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, UEDA Hiroshi, 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 20~40K 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 Y 系超電導コイルの熱的安定性と保護の検討を行っている。HTS 線材・コイルは, LTS に比べて圧倒的に高い熱的安定性を有しており, 機械的擾乱などによるクエンチの可能性は極めて低い。しかし一方で, 素線の疲労などによる局所的な I_c の低下などにより常電導部分が発生しても, 常電導伝播速度が極めて遅いため, 常電導転移の検出が難しく, 局所的な温度上昇が発生し熱暴走に至る危険性がある。そこで, 今回は SMES 用コイルを想定し YBCO 集合導体を巻線したコイルのクエンチ保護について検討したので報告する。

2. 集合導体コイルの転流

現在検討中のコイルは, Fig.1 のように導体として YBCO 線材(素線)を 4 枚積層して集合導体化したものを用いることを想定している。この集合導体は結合損失低減のため, 素線間絶縁を施す予定である。従って, I_c の低下などにより常電導部分が発生した場合, 線材の途中で他の線材に転流せず, 導体端部で転流が起きる。このような集合導体の素線に常電導部分が生じた場合の電流転流と各素線の温度変化を数値解析により評価した。

運転温度 20K で, 導体を構成する 4 枚の線材の内, 1,2,3 枚の素線が長手方向 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。解析結果の一例として, Fig.2 に系統安定化運転時(1680A→2160A→1680A の三角波パルスを 5 回通電)に Tape1 に劣化が発生した場合の集合導体内の電流の変化を, Fig.3 に各素線の温度変化を示す。Fig.2 のようにパルス通電中に転流が発生し, パルス終了後に, Tape1 の電流が約 200A まで減衰している。この時の劣化部の温度は約 30K となっている。

3. クエンチ検出

パルス通電中の誘導性電圧は 2kV であるのに対し, 常電導転移・伝播に伴う抵抗性電圧は 3.5mV と極めて小さくなっており, 電圧によるクエンチの検出は困難と考えられる。前節で述べたように素線絶縁を施した集合導体内での常電導転移に伴う転流は速やかに発生する。そこで発生する転流を監視すれば, クエンチの検出が可能になると考えられる。Table 1 に集合導体内の素線で常電導が発生した場合の, 各素線の最大電流と最小電流の差が 100A になるまでの時間とその時点での温度を示す。これによると 100A の電流差を検出した時点で, 常電導部の温度は 30~40K 程度であった。積層導体内の素線で常電導領域が発生しても, 温度上昇がそれほど高くない時点でクエンチの検出が可能と考えられる。

4. まとめ

素線絶縁された YBCO 集合導体を巻線したコイルのクエンチ検出法として, 素線間転流を利用する検出法を提案した。想定した SMES 用コイルにおいて 100A の電流差を検出した時点で, 常電導部の温度は 30~40K 程度であった。

なお, 本研究は「リ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。

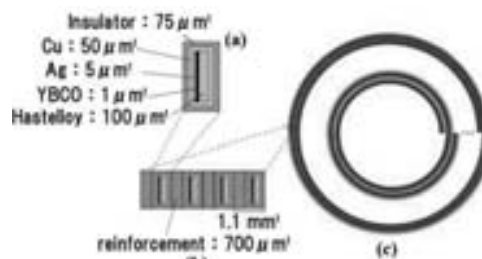


Fig.1 Schematic drawing of (a) YBCO tape, (b) conductor, (c) pancake coil

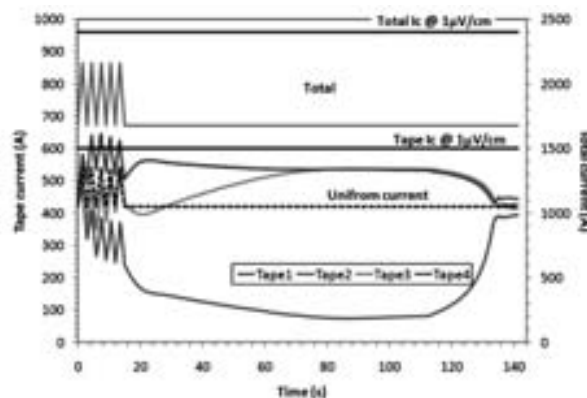


Fig.2 Current distribution in conductor

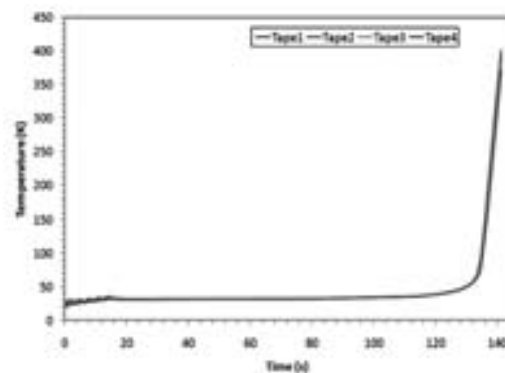


Fig.3 Temperature change in YBCO tapes

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

ReBCO テープ線材の磁場遮蔽

Magnetic field shielding by ReBCO tape conductors

松本 真治、木吉 司、内田 公(*) (物材機構)
 MATSUMOTO Shinji, KIYOSHI Tsukasa, UCHIDA Akira(*) (NIMS)
 E-mail: matsumoto.shinji@nims.go.jp

1. はじめに

高温超伝導テープ線材による磁場の遮蔽や線材を貫く磁束の時間変化について、これまで多くの研究がなされてきた。これら高温超伝導テープ線材の特性は、コイルの設計・製作においてよく考慮される必要がある。これまでに、配向性の良い超伝導層をもつ ReBCO テープ線材による磁場の遮蔽について報告した[1]。今回は、ReBCO テープ線材により遮蔽される磁場の時間変化について報告する。また、積層させた ReBCO テープ線材を磁場中冷却法により着磁し、擬バルク磁石として利用できる可能性について報告した[1]。既に、YBCO 薄膜超伝導体を積層させ、磁場中冷却法により着磁したマグネットの開発も進められている[2]。このように、ReBCO 線材は、超伝導コイル用材料として有望であるだけでなく、擬バルク磁石への転用も期待できる。ReBCO テープ線材を積層させた擬バルク超伝導体の捕捉磁場測定についても報告する。

2. 実験方法

実際のコイルを模擬し、線材による磁場の遮蔽を観測するため、短冊状の ReBCO テープ線材(幅 12 mm、長さ 30 mm)を同じ枚数積層させた束で、ホール素子(F.W.BELL-BHT921)を挟み込んで磁場(B_{hall})を測定した[1]。テープ線材の枚数は、片側の積層枚数(N)で表記する。外部磁場(B_{ex})は、テープ線材の幅広面に垂直方向に印加した。また、同様の短冊状 ReBCO テープ線材を積層させ束ねた擬バルク超伝導体に、磁場中冷却法により捕捉させた磁場は、その表面位置でホール素子により測定した。測定は、物質・材料研究機構強磁場共用ステーションにおいて、冷凍機冷却型超伝導マグネット(JASTEC-12T/100mm)を用いて行った。

3. 実験結果

ホール素子で測定した磁場(B_{hall})から外部磁場(B_{ex})を差し引いたものを遮蔽磁場(ΔB)と定義する。10 T を超える外部磁場中においても、線材が磁場を遮蔽する効果は残っており、外部磁場一定の下で時間変化を示した。ReBCO 線材、N=5 の場合について、外部磁場を 11 T に固定し測定した場合の遮蔽磁場の時間変化を Fig. 1 に示す。ホール素子で測定した磁場は、対数的に時間とともに増加した。よって、遮蔽磁場の時間変化は、磁束クリープによるものと考えられる。

Zr をドーブした Zr:ReBCO 線材を60枚束ねた擬バルク磁石(幅 12 mm、長さ 30 mm、厚み 10 mm)を 11 T で 4.2 K まで磁場中冷却し、磁場を捕捉させた場合の、捕捉磁場の時間変化を Fig. 2 に示す。消磁直後、約 2 T の捕捉磁場が観測され、その後、捕捉磁場は、対数的に時間とともに減衰した。

4. まとめ

短冊状の ReBCO 線材を積層して実際のコイルを模擬し、線材による遮蔽磁場の時間変化を観測した。線材による磁場の遮蔽は 10 T を超える磁場中でも観測され、対数的な時間変化を示した。これら線材の特性を、実際の超伝導コイルの設計・製作に如何に取り込むかが課題である。一方、ReBCO 線材を積層させた擬バルク磁石には、製作や冷却の容易さ

等の利点があるが、実用には、より大きな面積の線材で擬バルク磁石を製作する等の捕捉磁場の向上が必要である。

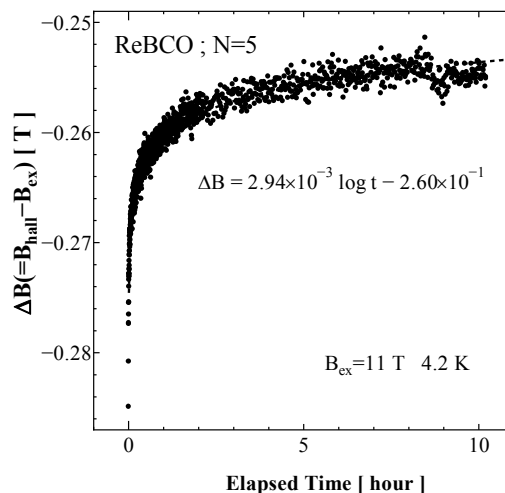


Fig. 1 Time dependence of the magnetic field shielding for N=5 in the magnetic field of 11 T at 4.2 K; it was described as a logarithmic function of time.

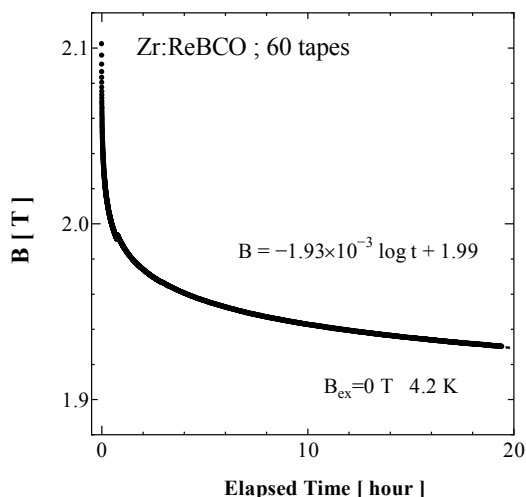


Fig. 2 Time dependence of the trapped magnetic field on the bundle stacked of 60 Zr:ReBCO tape conductors at 4.2 K; it was described as a logarithmic function of time. The bundle was cooled down to 4.2 K in the magnetic field of 11 T.

*現在の所属: NESTA

参考文献

1. S. Matsumoto et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 79 (2008) p.211
2. S. B. Kim et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 80 (2009) p.20

有効電力法による冷凍機冷却型 NbTi 超電導ヘルムホルツマグネットの クエンチ保護試験

Quench protection tests of a cryocooler cooled NbTi superconducting helmholtz magnet by an active power method

七戸 希, 村瀬 暁 (岡山大); 西島 元 (東北大); 玉川 克紀, 天谷 宗徳 (玉川製作所)
 NANATO Nozomu, MURASE Satoru (Okayama University); NISHIJIMA Gen (Tohoku University)
 TAMAKAWA Katsunori, AMAYA Munenori (Tamakawa Co., Ltd.)
 E-mail: nanato@cc.okayama-u.ac.jp

1. はじめに

著者らはこれまでに有効電力法に基づく超電導コイルのクエンチ保護システムについて報告してきており[1]-[3], 最近では NI PXI システムを用いたソフトウェアベースの保護システムについて, 液体窒素浸漬冷却における Bi2223 小型高温超電導コイルに対するその有効性を報告している[4]。本システムにて冷凍機冷却型 NbTi 超電導ヘルムホルツマグネット(65H, 6T at 80A, 4.2K)のクエンチ保護試験を行い, その有効性を確認できたため, 本稿ではその結果について報告する。

2. 実験回路

有効電力法に基づくクエンチ保護システムを Fig. 1 に示す。電流源によりスイッチを介してヘルムホルツ型マグネットに電流が供給される。ヘルムホルツ型マグネットは 2 分割されており, それぞれに保護用のダイオードを互いに逆向きに 2 個ずつ並列に取り付けている。マグネットがクエンチしたと判定された場合にはスイッチがオフとなり, 電源からの通電電流は遮断され, マグネットの磁気エネルギーはダイオードにて回収される。なお, ヘルムホルツ型マグネットは, (株)玉川製作所製の冷凍機冷却型の NbTi 超電導マグネットであり, 4.2K, 80A にて 6T の磁場を発生させる設計のものである。

3. 実験結果

マグネットを 4.2K に冷却し, 2A/min のスイープレートで励磁を行い, トレーニング過程で生じるクエンチを検出して保護を行う実験を試みた。Fig. 2 に実験結果を示す。すべての図はクエンチ前後の時間の波形を拡大したものであり, 時間軸は励磁開始から 1700 秒経過時を 0s として表示している。同図(a)は通電電流波形であり, 57A に達した時点(0.5s)でクエンチが発生した。同図(b)は有効電力法におけるクエンチ判定信号 P' であるが, クエンチ発生時に急激に立ち上がっており, クエンチを検出できていることがわかる。本実験では閾値を 107W に設定しており, 閾値に到達した時点で同図(c)のようにスイッチのゲート信号が切り替わり(スイッチがオフになり), 同図(a)のように通電電流が遮断され, 同図(d)のようにマグネット両端電圧が逆電圧に変化している。本実験にてマグネットのクエンチ後の最高到達温度は 43.1K であった。許容温度[5]よりも十分低い温度に抑えられていることから, PXI システムを用

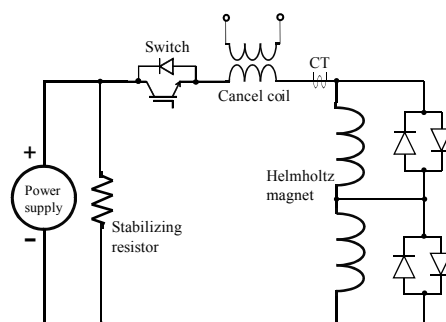


Fig. 1 Protection circuit

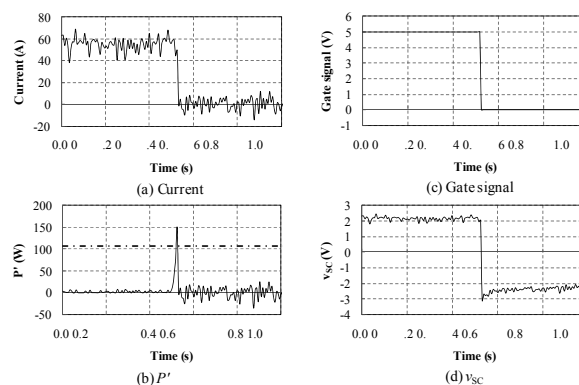


Fig. 2 Experimental results

いたソフトウェアベース保護システムの実用性が示唆された。

謝辞

本研究は財団法人日揮・実吉奨学会, 財団法人ウエスコ学術振興財団, パワーアカデミー, 財団法人カシオ科学振興財団の助成によることを付記し, ここに謝意を表します。

参考文献

- [1] N. Nanato: Proceedings of International Conference on Electrical Engineering 2008, No. P-171, CD-ROM
- [2] N. Nanato: IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials (Society A), Vol. 128-A, No. 6 (2008), p. 386
- [3] K. Takeuchi, et al.: Cryogenics, Vol. 48/3-4 (2008) p. 148
- [4] N. Nanato, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 81 (2009) p.100
- [5] Y. Iwasa: Case Studies in Superconducting Magnets, (2009) pp.468-471

液体窒素温度で動作する Bi-2223 超電導マグネットの高性能化の検討

Investigation of high efficiency Bi-2223 superconducting magnet working at liquid nitrogen temperature

中村 遼太, 木内 勝, 小田部 荘司, 松下 照男 (九工大);

林 敏広, 藤野 剛三 (住友電工); 倪宝栄 (福工大);

NAKAMURA Ryouta, KIUCHI Masaru, OTABE Edmund Soji,

MATSUSHITA Teruo (Kyushu Inst. of Tech.);

HAYASHI Toshihiro, FUJINO Kousou (Sumitomo Electric Industries);

NI Baorong (Fukuoka Inst. of Tech.);

E-mail : nakamura@aquarius10.cse.kyutech.ac.jp

1. はじめに

Bi-2223 超電導体は、液体窒素温度での応用が可能とされる高温超電導体の1つで、機械的に長尺線材の製造が可能であり、現在では2 km級のテープ線材の製造も可能となっている。また、線材の製造法であるPIT(Powder In Tube)法や、その焼結プロセスであるCT-OP(Controlled-Over Pressure)法も最適化が進み、線材の特性も向上している。

Bi-2223には大きな磁界角異方性があり、Bi-2223テープ線材にかかる磁界方向によって性能が大きく異なる。Bi-2223テープ線材に対して垂直方向の磁界により臨界電流が決定すると中心最大磁界が大きく低下する。これまでの研究で超電導マグネットの両端に鉄フランジを設置することでテープ線材にかかる磁界の垂直成分を減らし、中心最大磁界を0.78 Tまで向上させることに成功した[1]。作成したモデルの概形をFig. 1に示す。図中の概形はコイルの断面の半分を表している。

本研究では超電導マグネットの更なる性能の向上を目指し、Fig. 1のbase modelを基本として、スクリプトを用いる事で上下鉄フランジの厚さや、超電導コイルの巻き数などの様々なパラメータを変更した数多くのモデルを作成する事を可能とした。それらの結果からBi-2223テープ線材にかかる磁束密度や中心最大磁界の推移などを調べ、超電導マグネットの性能の最適化を狙う。

2. 数値解析

今回は以下の様なパラメータを変更し有限要素法(FEM)による数値解析を行った。いくつかのモデルはFig. 1に概形を示している。

- i 上下鉄フランジ
- ii 鉄フランジ突起
- iii 超電導コイル
- iv 超電導マグネット内に鉄プレート配置

中心最大磁界以外にも、Bi-2223テープ線材にかかる平行、垂直成分の磁束密度、超電導マグネットの臨界電流、均一度を計算し、超電導マグネットの特性評価を行うことで最適値を求める。

3. 結果及び検討

i 上下鉄フランジ

上下鉄フランジの厚さを大きくすればするほど、微量ではあるが中心最大磁界は大きくなっていった。内径を小さくすると、均一度の上昇が著しい。中心最大磁界は、内径が10 mmになった時にピークがみられた。外径を小さくすればするほど中心最大磁界は低下し、超電導コイルよりも小さくなった時、著しい低下を見せた。

ii 鉄フランジ突起

突起の位置や厚さを変えることによるメリットは見られなかった。突起の長さが3-5 mmまでの間で中心最大磁界が向上しており、5 mmの時最も大きい中心最大磁界を得られた。突起を二つにした時もほぼ変わらない結果だったが、鉄フランジ突起により上下鉄フランジを連結した時中心最大磁界が向上した。そこでFig. 1 iiの様に上下鉄フランジを後方突起によって連結し、厚さを変えたが、厚さによる大きな変化は見られなかった。

iii 超電導コイル

上下鉄フランジをFig. 1のbase modelよりも大きくし、コイルの巻き数を増やしたところ中心最大磁界が大きく向上した。コイル間の距離を離れた場合、中心最大磁界が減少するが、均一度は上昇した。

iv 鉄プレート配置

コイル内壁に鉄プレートを配置した場合、Bi-2223テープ線材に対して垂直成分の磁界が大きくなり、中心最大磁界が減少する。中心付近に鉄プレートを配置した場合は均一度が大きく下がるが、中心最大磁界が向上した。コイル間の距離を大きくした時にFig. 1 ivの様に、コイル間に鉄プレートを配置すると、磁界の平行成分が大きくなり、中心最大磁界が向上した。またコイルの巻き数に対して最適な鉄プレートの厚さが見られた。

以上のような検討を行い、コイルの巻き数は527巻き、ボア径は54 mm、フランジ径は742 mmの時、約1.5 Tの中心最大磁界を得られることがわかった。鉄フランジ突起の最適値や、フランジの形状を大きくしコイルの巻き数を増やすことにより、更なる改良の見通しを得ることが出来た。

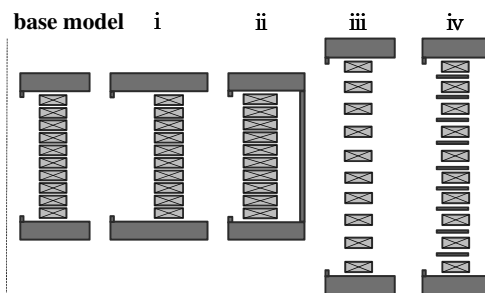


Fig. 1: Cross section of coil

4. 参考文献

- [1] E.S. Otabe, *et al.*: Abstracts of CSJ Conference, **80** (2009) 100.

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磁場設計

Magnetic 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10m、総重量が約100トン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。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ダイポールマグネットの磁場設計について発表する。

2. コイル断面の設計方法

重粒子線用回転ガントリーに装備する超伝導ダイポールマグネットでは、漏れ磁場の遮蔽と超伝導コイルの電磁力支持を同時に行うために、超伝導コイルの外周に鉄を配置する。従って、超伝導コイルを設計する際には、鉄の飽和の影響を考慮しなければならない。そこで、本研究では、独自に開発した空芯コイル最適化断面設計コードと汎用有限要素法ソフトANSYS[1]を併用して、コイル断面の設計を行った。その際、コイル形状は、従来の加速器用超伝導マグネットで使用される $\cos\theta$ 型(鞍型)である。

コイル断面設計の手順は、以下の通りである。始めに、目標とする磁場の多極成分(b_1, b_2, b_3, \dots)を設定する。次に、空芯コイル最適化断面設計コードを使用して、目標値を実現する空芯コイルの断面設計を行う。その後、ANSYSを使用して、外周に鉄を設置したコイルの2次元磁場計算を行う。その磁場計算結果を評価して、設計要求値を満たした場合はコイル断面設計が完了する。設計要求値を満たさない場合は、磁場計算結果と目標値の差 Δb_n を考慮した新たな目標値を設定して、再度、上記のコイル設計を行う。

3. 超伝導ダイポールマグネットの断面形状

コイル断面設計を行う際に使用したパラメーターをTable 1に示す。本コイルに使用する超伝導線には、高精度のコイル巻線作業を可能にするSurface winding法[2]に対応した径0.9mmのNbTiを採用した。設計パラメーターを基にして、上記2の設計方法により、コイル断面設計を行った結果、コイルのターン数は3588、コイルの厚みは30mm程度となった。また、コイルの層数は26となり、1層目から25層目は、磁場強度を向上させるためにパッキングファクターを上げた断面形状、26層目は磁場分布を調整するための断面形状となっている。Fig.1に、超伝導ダイポールマグネット断面の概略図を示す。コイル外周には、純鉄からなるカラーが設置され、その外側にはカラーを拘束するSUSが設置されている。また、最外周には、マグネット中心磁場が3Tの際に、カラーからの0.5T程度の漏れ磁場を遮蔽するために、炭素鋼SS400からなる真空容器が設置されている。Table 2に、マグネットボア内の磁場分布を多極成分で評価した結果を示す。純鉄が飽和しない(通電電流70A)場合、及び純鉄が飽和する(通電電流140A)場合において、設計で要求される 1.0×10^{-3} の磁場精度を満たすことができた。

Table 1 Design parameters of the superconducting dipole magnet for the rotating gantry

Coil inner diameter	150 mm
Good field region	80 mm
Magnetic field strength at the coil center	1.5 T & 3 T
Bending radius	2.2 m
Bending angle	20 degree
Superconducting wire	NbTi
Wire diameter	0.9 mm
Cu ratio	4

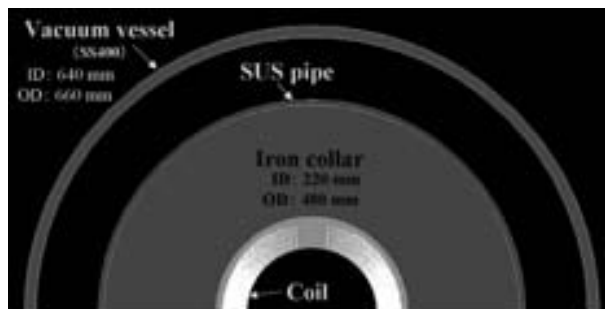


Fig.1 Cross-section of the superconducting dipole magnet for the rotating gantry

Table 2 Multipole coefficient b_n of the superconducting dipole magnet for each current at reference radius 40 mm

I [A]	70.0	140.0	Target
B_0 [T]	1.48	2.95	
b_1	10000.0	10000.0	10000.0
b_2	0.0	0.0	0
b_3	-2.3	-3.8	0
b_4	0.0	0.0	0
b_5	-2.8	-2.8	0
b_6	0.0	0.0	0
b_7	0.7	-0.1	0
b_8	0.0	0.0	0
b_9	-0.1	0.1	0
b_{10}	0.0	0.0	0

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

- http://www.cybernet.co.jp/ansys/
- T. Obana, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 16 (2006) p.216-219

電子ビーム蒸着法で Al テープ基板上に作製した MgB₂ 薄膜の磁束ピンニング特性

Flux pinning properties of MgB₂ thin films on Al tape substrates by electron beam evaporation

米倉 健志, 藤吉 孝則, 末吉 哲郎 (熊本大学); 土井 俊哉, 西川 隆文 (鹿児島大学)

YONEKURA Kenji, FUJIYOSHI Takanori, SUEYOSHI Tetsuro (Kumamoto Univ.);

DOI Toshiya, NISHIKAWA Takafumi (Kagoshima Univ.)

E-mail: kenji@st.cs.kumamoto-u.ac.jp

1. はじめに

MgB₂ 超伝導体は金属系超伝導体の中で最高の臨界温度 T_c を有しているが, 実用化の際には磁場中での臨界電流密度 J_c の向上が必要となる。低温成膜が可能な as-grown 法の電子ビーム蒸着法 (EBE 法) [1] で作製した薄膜は比較的高い T_c を得ることができ, MgB₂ の結晶粒界が主要なピンニングセンターとして作用することが知られている [2,3]。MgB₂ 結晶は基板に対してエピタキシャル成長するため, 基板物質を変えることで磁束ピンニング特性を制御できると考えられる。

本研究では, Al テープ基板上に MgB₂ 薄膜を電子ビーム蒸着法で作製した。作製した薄膜の臨界電流密度の磁場依存性や磁場角度依存性を測定し, ピンニング特性について考察した。

2. 実験

EBE 法を用いて Mg と B の蒸着量を独立に制御し, 組成比の異なる 2 つの MgB₂ 薄膜を Al テープ基板上に作製した。成膜レートは Al-T15 が, Mg:B=1.5nm/s:0.7nm/s, Al-T16 が Mg : B=1.4nm/s : 0.7nm/s である。また, 組成比は Al-T15 が Mg : B=1.0 : 2.0, Al-T16 は Mg:B=1.0 : 2.16 である。作製した薄膜は通電特性を測定するためにマイクロブリッジパターンに加工した。四端子法によって通電特性を測定し, 電界基準を 1 μ V/cm として J_c を決定した。また, J_c の磁場依存性, 磁場角度依存性を評価した。

3. 実験結果

Fig.1 に $T=10$ K での J_c の磁場依存性を示す。磁場は薄膜に対して垂直に印加している。比較のため以前に同様な方法で作製した異なる基板の MgB₂ 薄膜の作製条件と T_c を Table 1 に示している。今回作製した Al-T15 と Al-T16 は高磁場では Si 基板上に作製した薄膜と同じくらいの J_c を示し, 低磁場ではそれより高い J_c を有している。Al テープ基板 MgB₂ 薄膜における比較では, 低磁場では組成比がストイキオメトリックな Al-T15 が高い J_c を示しているが, 4T 以上ではノンストイキオメトリックな Al-T16 が高い J_c を示している。この原因として, Al-T16 は MgB₂ に対して

Table 1. MgB₂ 薄膜の作製条件

試料名	基板温度	膜厚	背圧	T_c
Al-T15	220°C	250nm	3.0×10^{-7} Pa 以下	29.5K
Al-T16	220°C	250nm	3.0×10^{-7} Pa 以下	29.6K
Si	250°C	270nm	5.0×10^{-7} Pa	35.8K
Al ₂ O ₃	230°C	270nm	2.0×10^{-7} Pa	32.4K

B が過剰であるため, Mg 欠損もしくは Mg サイトへの B 置換が生じ, これらの欠陥が高磁場でのピンニングセンターとして作用していると考えられる。

Fig.2 に $\theta=0^\circ$ で規格化した $T=20$ K, $B=3$ T での J_c の磁場角度依存性のグラフを示す。 $\theta=0^\circ$ は $B//c$, $\theta=90^\circ$ は $B \perp c$ の磁場角度を示している。すべての試料において $\theta=0^\circ$ で大きなピークを示しており, このことは全ての試料において c 軸相関のピンニングセンターが存在することを示している。また, 巨視的ピン力密度の磁場依存性や, そのスケール結果などから基板物質によるピンニング特性の違いを議論する。

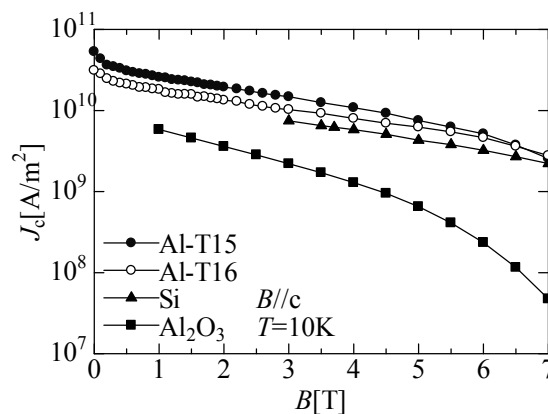


Fig.1 Magnetic field dependence of critical current density at 10K for $B//c$.

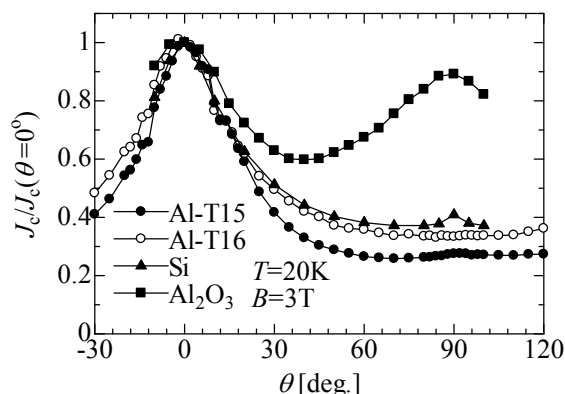


Fig.2 Angular dependence of critical current density normalized by $J_c(\theta=0^\circ)$ at 20K for 3T.

参考文献

- [1] M. Okuzono, et al.: Appl. Supercond. 15 (2005) 3253.
- [2] H. Kitaguchi, et al.: Appl. Phys. Lett. 85 (2004) 2842.
- [3] M. Haruta, et al.: Supercond. Sci. Technol. 18 (2005) 1460.

MgB₂ 線材の圧延による臨界電流密度の増加に対する考察Investigation of increase in critical current density of MgB₂ wire by rolling

谷川 潤弥, 木内 勝, 小田部 荘司, 松下 照男(九工大); 川越 明史, 川畑 秋馬, 住吉 文夫(鹿児島大)

柳 長門, 三戸 利行(核融合研); 高橋 雅也, 和久田 毅(日立)

TANIGAWA Jun-ya, KIUCHI Masaru, OTABE Edmund Soji, MATSUSHITA Teruo(KyushuInst.of Tech.);

KAWAGOE Akifumi, KAWABATA Shuma, SUMIYOSHI Fumio (Kagoshima Univ.)

YANAGI Nagato, MITO Toshiyuki (NIFS); TAKAHASHI Masaya, WAKUDA Tsuyoshi (Hitachi, Ltd.)

E-mail : tanigawa@aquarius10.ces.kyutech.ac.jp

1. はじめに

MgB₂は金属系超伝導体の中で最も高い臨界温度 T_c (約 39 K)を示し、20 K 近傍での実用化に向けた研究が盛んに行われている。我々は、*in-situ* 法によって作製された Nb バリアのある Cu シース材の MgB₂ 線材を圧延することで、臨界電流密度 J_c が高くなるとともに、 J_c の磁界角度異方性が生じることも明らかにした[1]。今回は上部臨界磁場 B_{c2} などの測定を通し、それらの J_c の変化の原因について考察を行った。

2. 実験

直径 0.8 mm の MgB₂ の丸線材とそれをテープ状に圧延した線材で実験を行った。各試料のフィラメントサイズは Table 1 に示す。圧延による T_c 劣化はなく、どの試料も 36.9 K だった。なお、Tape2、Tape4 の試料全体アスペクト比はそれぞれ 2 と 4 である。テープ面に対して平行方向に磁界を印加したときを EO、垂直方向に磁界を印加したときを FO としている。なお丸線材の場合は、電流方向に対して垂直に磁界を印加した。測定は SQUID 磁力計を用いた直流磁化法で J_c - B 特性を、磁化緩和率測定から E - J 特性を評価した。また、直流四端子法で B_{c2} - T 特性を評価した。

Table 1 : Size of superconducting filament in each specimen

speciment	filament size [mm]	Aspect ratio
Wire	ϕ 0.415	-
Tape2	0.616 × 0.265	2.32
Tape4	1.162 × 0.126	9.22

3. 結果及び検討

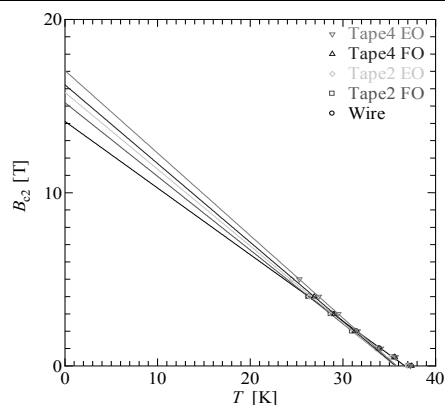
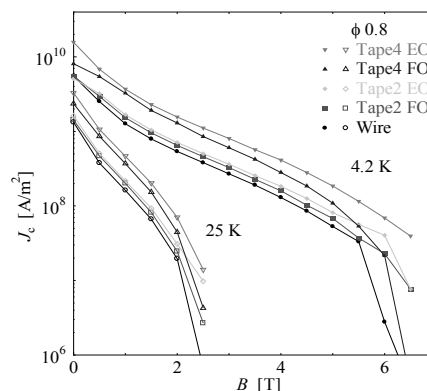
Fig.1 に B_{c2} - T 特性を示す。直線部分を温度 $T=0$ K まで外挿して評価した $B_{c2}(0)$ の値を Table 2 に示す。圧延することで $B_{c2}(0)$ が増加していることが分かる。圧延することで歪みが生じ、コヒーレンス長 ξ が短くなったためと考えられる。さらに、FO よりも EO の方が B_{c2} が高いことが分かる。これは、MgB₂ の単結晶の異方性が 3~4

であることから、圧延によって結晶の配向が少しそろったためと考えられる。

Fig.2 に J_c - B 特性を示す。圧延すると $B_{c2}(0)$ の増加に伴い、 J_c が増加していることが分かる。これについての詳細や J_c の磁界角度異方性については当日報告する。

Table 2: Upper critical field at 0 K

specimen	Wire	Tape2 FO	Tape2 EO	Tape4 FO	Tape4 EO
$B_{c2}(0)$ [T]	14.1	15.2	15.8	16.2	17.1

Fig. 1. B_{c2} - T properties.Fig. 2. J_c - B properties at 4.2K and 25K.

参考文献

- [1] 若林ら：第 80 回低温工学・超電導学会予稿集
2009 年 3 B-a06

DyBCO 系超伝導バルクの作製と置換効果

Crystal growth and substitution effect of DyBCO bulk superconductor

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

REBaCuO(REBCO)超伝導バルクの臨界電流密度 J_c 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。例えば、YBCO バルクにおいて CuO_2 面の Cu を Zn や Ni、または CuO 鎖の Cu を Ga や Co で微量の置換を行うことで $J_c(B)$ 特性が向上することが報告されている[1,2]。我々は YBCO バルクに比べて熱伝導が低く、電流リードなどで応用が期待される DyBCO バルクに着目した。今回、DyBCO バルクに La, Pr, および Gd イオンを微量置換し、そのピン止め特性の向上について検討した。

2.実験方法

$(\text{Dy}_{1-x}\text{RE}_x)\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (RE=La, Pr, および Gd) [$x=0, 0.003, 0.005, 0.01$] 焼結体は $\text{Dy}_2\text{O}_3, \text{BaCO}_3, \text{CuO}$ および、 La_2O_3 (又は $\text{Pr}_6\text{O}_{11}, \text{Gd}_2\text{O}_3$)を秤量・混合し 900°C で 24hの仮焼、 940°C で 24hの本焼を行い作製した。 $\text{Dy}_2\text{BaCuO}_5$ 焼結体は $\text{Dy}_2\text{O}_3, \text{BaCO}_3$ 、および CuO を秤量・混合し 800°C で 24hの仮焼を6回行った後、 820°C で本焼きを行い作製した。 $(\text{Dy}_{1-x}\text{RE}_x)\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ と $\text{Dy}_2\text{BaCuO}_5$ 焼結体をモル比 10:3 で用意し、これに 0.5wt%の CeO_2 、10wt%の Ag_2O を加えた混合粉を直径 20mm、厚さ 10mm のペレット状に加圧・成形し前駆体とした。バルク試料は cold seeding による溶融法で作製した。種結晶には劈開した NdBCO バルクを使用した。最初 1030°C まで加熱して 2h 保持した後、包晶温度まで急冷し、そこから $0.5^\circ\text{C}/\text{h}$ で徐冷して結晶成長を行った。その後得られたバルクを 400°C で 1 週間酸素アニールした。捕捉磁場分布は、2T の磁場中冷却により着磁しバルク表面を Hall 素子を使用して測定した。

3.結果と考察

Fig.1(a)–1(d) に各 $(\text{Dy}_{1-x}\text{RE}_x)\text{BCO}$ バルクの捕捉磁場分布を示す。いずれもコーン型になっており育成されたバルクがシングルドメインであることを示している。最大捕捉磁場は、無置換バルクは 0.473 T、La1%置換は 0.435 T、Pr1%置換は 0.263 T、Gd1%置換は 0.310 T であった。無置換バルクに比べて置換バルクの最大捕捉磁場が低い結果となった。現在、 T_c と J_c を測定中である。講演ではそれらの結果と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) 1345–1346

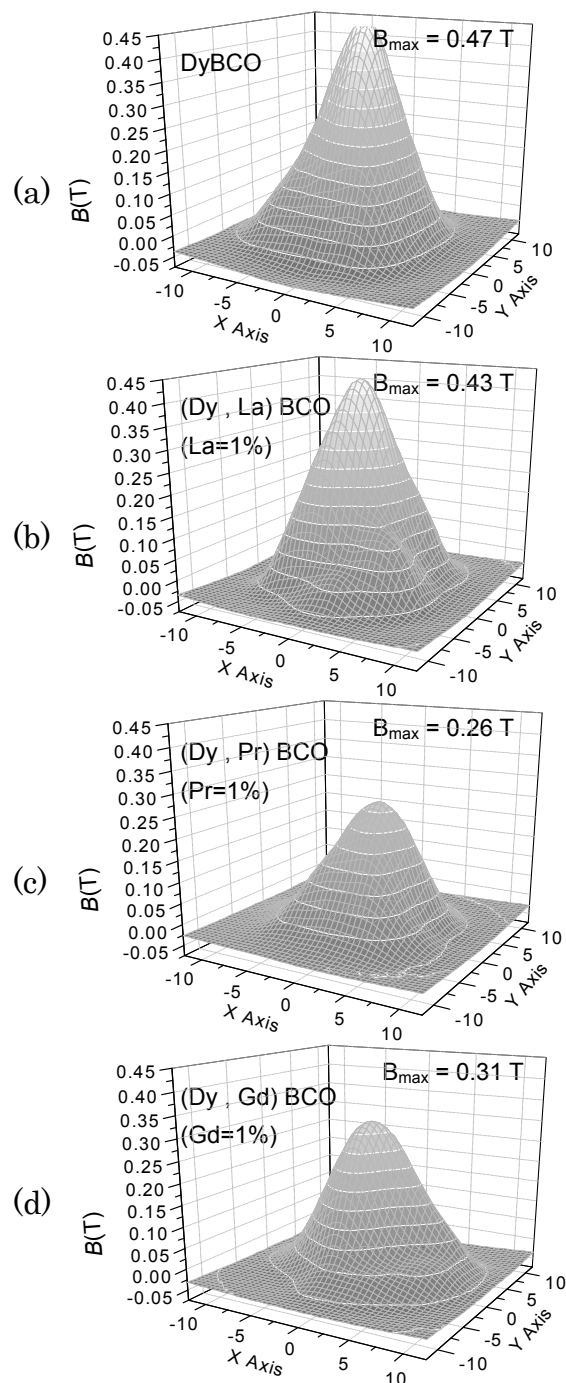


Fig.1 : Trapped magnetic field distribution at 77K of DyBCO and $(\text{Dy}_{0.99}\text{RE}_{0.01})\text{BCO}$ (RE=La, Pr, and Gd) bulks.

Y系バルク超伝導体を用いた演示実験用磁気浮上装置の製作

Fabrication of a magnetic levitation system using YBCO bulk superconductors for demonstrative presentation

原田 瑞貴, 原田 直幸, 岡田 秀希, 崎山 智司(山口大); 小田部 荘司(九工大)
 HARADA Mizuki, HARADA Naoyuki, OKADA Hideki, SAKIYAMA Satoshi (Yamaguchi University);
 OTABE Edmund Soji (Kyushu Institute of Technology)
 E-mail: p040vj@yamaguchi-u.ac.jp

1. はじめに

山口大学工学部では、「ものづくり」、「創造性育成」、「デザイン」を連携させた「ものづくり創成教育」を行うことを目的とし、平成15年に「工学部附属ものづくり創成センター」を発足させた。その後、平成17～19年度文部科学省特別教育研究経費「造形ものづくり教育維新プロジェクト」により、学生に対するものづくり創成教育プログラムの開発・実践およびそのための環境整備を行ってきた。¹⁾また、平成20年度から山口県内の産学公民の各機関と協力して「長州科楽維新プロジェクト」^{2,3)}に取り組んでいる。この取り組みの中で演示実験の1つとしてバルク超伝導体を用いた磁気浮上を取り上げた。本報告では、この装置の製作と演示実験について述べる。

2. 長州科楽維新プロジェクト

「長州科楽維新プロジェクト」は山口大学が中心となり参加機関と協力して、小中学生に科学技術の楽しさを伝え、科学技術立国日本を担う人材を育成することを目的としている。具体的には、産学公民が協力して、①科楽奇兵隊による出前科楽教室、②楽しく学べる教材の開発、③科楽塾長・師範の養成、④科楽少年隊の創設などの活動を行いながら、山口県内に科学を楽しむネットワークの構築を進めている。

3. 磁気浮上装置の製作

磁気浮上装置の模式図をFig.1に示す。液体窒素を入れる容器は 550mm×550mm×120mm の硬質の発泡スチロール(27kg/m³)に機械加工を行って製作した。また、中央と外周部分には冷却の初期段階で液体窒素を保持しておくための凹みを設けている。上部の円板は、浮上実験で回転できるように同心円状にネオジウム磁石を配置している。この円板は外径φ340mm、厚さ33mm、質量19kg、表面における磁束密度は最大で600mTである。

次に、発泡スチロールの容器に超伝導体を配置した状態をFig.2に示す。市販のφ46mm×7mmのバルク超伝導体26個を置き、更にφ30mm×10mmの超伝導体18個をその間に配置している。超伝導体と円板の間隔を18mmに設定して、液体窒素で超伝導体の冷却を行い、その後大人が円板の上に乗った様子をFig.3に示す。このときの超伝導体と円板の間隔は10mmであった。人の代わりに48kgの重りを入れて、液体窒素を補充しながら連続して2時間の浮上実験を行った結果、この間の浮上高さの変化が1mm以下であることから、演示実験やイベント等で使用できることを確認した。Fig.4は人が乗っていない状態の写真である。

4. 演示実験

2009年12月14日に山口県下関市の商業施設において行われた「おもしろ科学実験」の中でこの装置を用いて演示実験を行った。小学生とその保護者を中心に約50名の参加者が浮上と回転を体験した。今後は、山口県内の小中学校を中心に演示実験を実施する予定である。

参考文献

1. 崎山智司他:平成20年度工学・工学教育研究講演会講演論文集, (2008) p.96

2. <http://www.kagaku-ishin.org/>

3. 崎山智司他:産学連携学会第7回大会講演予稿集, (2009) p.155

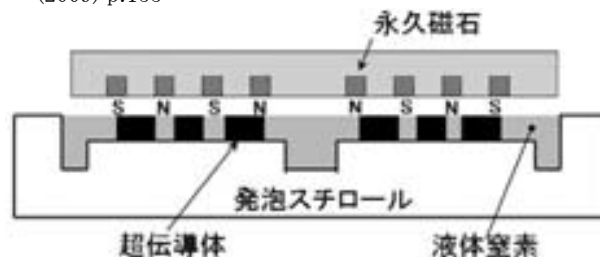


Fig.1 Schematic illustration of magnetic levitation system.

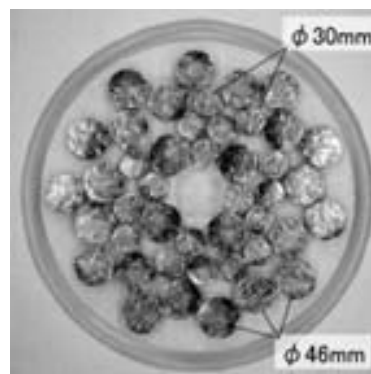


Fig.2 Arrangement of superconductors on polystyrene form base.



Fig.3 An example of magnetic levitation.

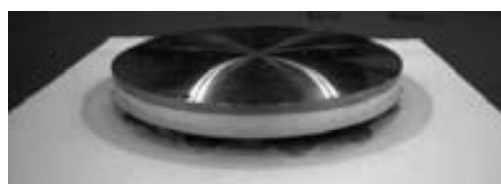


Fig.4 Magnetic levitation system.

中性子回折を用いた ITER TF 導体の内部歪測定

Neutron diffraction measurement of internal strain in the ITER TF conductor

辺見 努, ハルヨ ステファヌス, 松井 邦浩, 小泉 徳潔, 布谷 嘉彦, 高橋 良和, 中嶋 秀夫, 伊藤 崇芳, 相澤 一也, 鈴木 裕士(原子力機構); 町屋 修太郎(大同大学); 土屋 佳則(NIMS); 長村 光造(応用科研)

HEMMI Tsutomu, HARJO Stefanus, MATSUI Kunihiro, KOIZUMU Norikiyo, NUNOYA Yoshihiko, TAKAHASHI Yoshikazu, NAKAJIMA Hideo, ITO Takayoshi, AIZAWA Kazuya, SUZUKI Hiroshi (JAEA); MACHIYA Shutaro (Daido Univ.);

TSUCHIYA Yoshinori (NIMS); OSAMURA Kozo (RIAS);

E-mail: hemmi.tsutomu@jaea.go.jp

1. はじめに

核融合炉の超伝導コイルに使用されるケーブル・イン・コンジット型(CIC)導体は、多数の超伝導素線及びステンレス鋼製のジャケットから構成される。CIC 導体では、超伝導生成熱処理温度 923 K から運転温度約 5 K までの素線とステンレス鋼の熱膨張率の違いによる熱歪、さらに通電による電磁力により素線に歪が加わる。Nb₃Sn 素線の超伝導特性は歪状態によって大きく変化するため、歪状態を把握する必要があるが、多数本の素線から成る撚線構造とジャケットの内側に素線が配置されているため、導体内の素線の歪を直接測定することは困難であった。このため、これまでにはジャケットの歪からの間接的な推定や導体の性能試験の結果と素線の特徴から実効的な歪を評価する方法で評価されてきた¹⁾。

導体内の素線の歪を測定できれば、導体内の歪分布及び曲げ歪の影響等、超伝導特性の劣化機構を詳細に調べることが可能になる。このため、大強度陽子加速器施設(J-PARC)で2008年から運転が開始された工学材料回折装置「匠」による中性子回折を用いた導体の内部歪測定を試みた。

2. 測定方法及び結果

匠による中性子回折では、Fig.1 のように中性子を試料に入射し、回折した中性子を90°方向に設置された検出器により中性子の飛行時間を測定する Time of Flight(TOF)法を用いている。TOF 法では各材料の多数の回折面の面間隔を測定でき、得られた面間隔と無歪の試料の面間隔を比較することでその回折面の歪を決定することができる。測定では、入射スリットとコリメータにより、導体内の7×22×2 mm³の領域について軸方向と径方向の回折プロファイルを同時に測定した。試験サンプルとしては、端部の拘束が無い、素線材料の熱収縮率の違いによる熱歪のみが残ると推定される長さ 100 mm の ITER トロイダル磁場(TF)コイル用導体とした。

導体内の Nb₃Sn の割合は 6%程度であり、導体内を透過する中性子のパスが最も長い軸方向ではそのパスは約 60 mm になる。これに対して、世界最高精度で内部歪を測定できる匠を用いることで Fig.2 に示す Nb₃Sn の導体軸方向の回折ピークを観測することに成功した。Nb₃Sn の回折ピークは、最も大きなピークである Cu(111)面に対して 1%前後と小さいが、Nb₃Sn の多数の回折ピークが確認できる。Nb₃Sn(211)面について、フィラメント単体で測定した無歪の Nb₃Sn と本測定結果の比較を Fig.3 に示す。この結果から評価した歪は-0.25%となり、同様な構成のブロンズ法 Nb₃Sn 素線の単体での測定結果(-0.26%及び-0.19%)に近いことを確認した。

3. まとめ

匠による中性子回折を用いることで、CIC 導体を構成する素線の Nb₃Sn フィラメントの格子面間隔を直接観測することができ、内部歪を測定できる見通しを得た。中性子回折による歪測定は導体の内部歪を研究する上で、強力なツールになると期待される。今後、導体から取り出した素線及び単体で超伝導生成熱処理した同一素線の測定を行い、さらに妥当性を検証する予定である。

参考文献

1. K. Matsui, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., 19 (2009) p.1470.

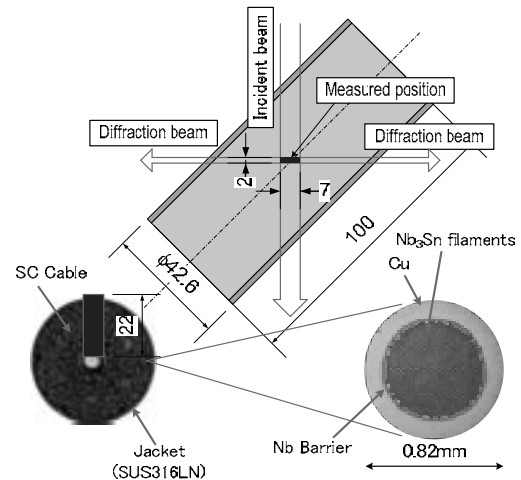


Fig.1 Neutron diffraction measurement of the TF conductor.

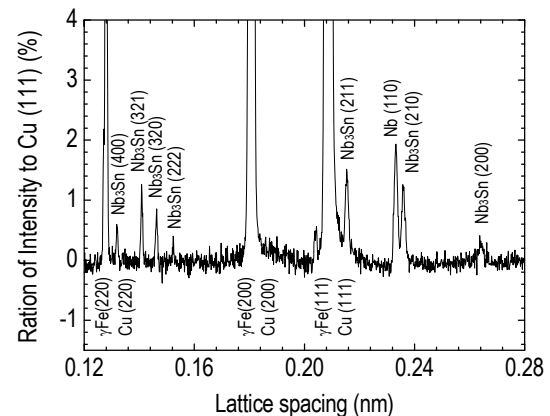


Fig.2 Neutron diffraction profile of the TF conductor.

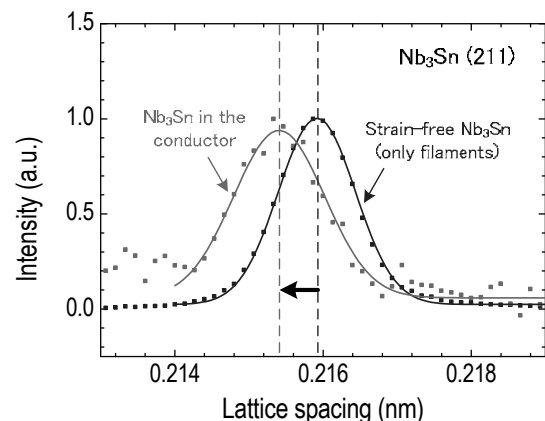


Fig.3 Difference in the diffraction profiles.

JT-60SA の高速位置制御コイルの概念設計

A conceptual design of the Fast Plasma Position Control Coils for JT-60SA

浅川 修二, 吉田 清(原子力機構)
 ASAKAWA Shuji, YOSHIDA Kiyoshi (JAEA)
 E-mail: asakawa.shuji@jaea.go.jp

1. はじめに

JT-60SA のトカマク本体を超伝導化する計画が、日本と欧州連合(EU)間の共同プロジェクト「サテライトトカマク装置(JT-60SA)」として推進されている。超伝導コイルシステムは中心ソレノイド(central solenoid: CS), 平行磁場コイル(equilibrium field coil: EF coil), トロイダル磁場コイル(toroidal field coil)や高速位置制御コイル(fast plasma position control coil: FPPC coil), 誤差磁場補正コイル(error field correction coil)などの真空容器(vacuum vessel: VV)内コイルから構成される[1]。本報では半径約4m, 120KATのFPPCコイルの設計, 組立方法, 熱・構造解析などについて報告する[2]。

2. 設計

FPPCコイルはプラズマの中心から上下に1.6mの位置に, VVと安定化板との間に設置される。設計仕様は電流値120KAT, 半径約4m, 通常運転100秒, インターバル1800秒, ベーキング温度200°C, 絶縁材の吸収線量は0.6MGy/10yearなどである。コイルは直径12mmの冷却孔を有する31×31mmの無酸素銅23ターンにより構成される。全長は約600mとなる。冷却水の流速は1m/sとし, 0.8MPaの圧力損失を確保する。絶縁レベルはF種(155°C以下), 吸収線量1MGy/10yearに耐える絶縁材DGEBA(diglycidyl ether of bisphenol a epoxy), TGDM(tetraglycidyl diaminodiphenyl methane)などを使用する。導体はターン絶縁, 対地絶縁が取られ, 全体をスペーサとインコネル625の板により囲っている。さらにコイルをクランプして, フレキシブル板により支え, サポート構造として全周18箇所ですべてVVに取り付ける。フレキシブル板は電磁力, 熱による変形やベーキング時に温度を緩和するなどの役割も担う。FPPCコイルの断面をFig.1に, サポート構造をFig.2示す。

3. 組立

FPPCコイルはVV内で組み立てられる。EFコイルやCSと同様に作成され, スプールに巻かれた約600mの導体をVV内にポートを通じて導入する。VV内にはターンテーブルなどの作業場が作成され, VV内に導入された導体をベンダーにより巻いて, 組み立てていく。組み立てられたFPPCコイルは上下それぞれ順次設置していく。FPPCコイルのフィーダーはジョイントボックスにより接続されVV外に導きられる。VV内での組み立て状況をFig.3に示す。

4. 熱・強度解析

FPPCコイルとサポート構造を解析対象とした熱解析と構造解析により構造の健全性を確認している。解析モデルは対称性を考慮して1/36モデルとする。通常時の導体の温度は65°C(100秒)以下であり, またベーキング時にはフレキシブル板により温度が低減され, コイルの温度は83°C以下となる。いずれも155°C以下であり, F種の絶縁レベルを満たす。

さまざまなプラズマの事象によりFPPCコイルに働く電磁力をDINAコードにより求めている[3]。内向きと外向きそれぞれについて最大電磁力(ディスラプション時)は-6.14MN(内向き), 1.54(上向き)と4.05MN(外向き), -1.93(下向き)である。それぞれの電磁力が熱荷重と同時に働く通常時と熱荷重のみのベーキング時の構造解析を行なう。解析結果は導体とフレ

キシブル板ともASMEに準拠した規格を満たす[4]。対称性を考慮した180°モデルでの水平電磁力が働いた場合でも同様に規格を満たす。また, 360°の解析モデルにおける固有値解析での最小固有振動数は30Hzである。

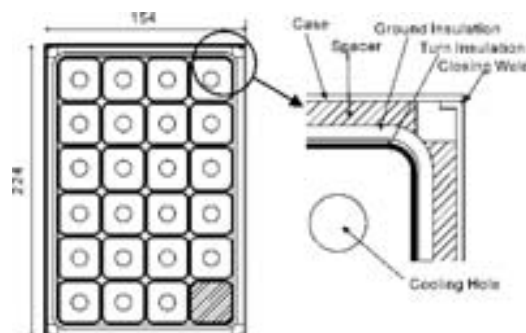


Fig.1 Cross section of FPPC coil (mm)

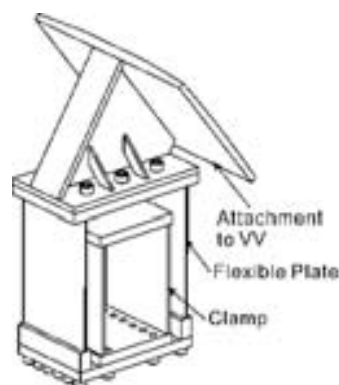


Fig.2 Support structure for the FPPC coil

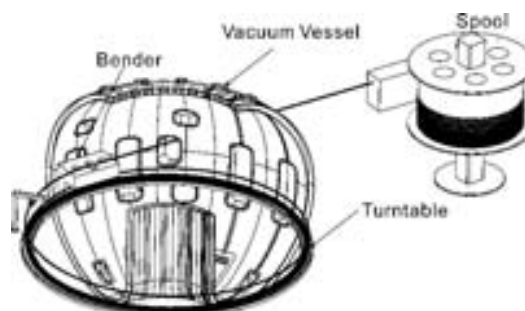


Fig.3 Winding the coil inside vacuum vessel

参考文献

1. S. Asakawa, et al.: in the Asia Plasma and Fusion Association (APFA2009), (2009) p.35
2. K. Yoshida, et al.: in the Asia Plasma and Fusion Association (APFA2009), (2009) p.79
3. R. R. Khayrutdinov, et al.: JOURNAL OF COMPUTATIONAL PHYSICS, 109(1993) p. 193
4. JAME: JSME S KAI-2008, (2008)

ヘリオトロン炉FFHRにおける熱流束低減のための 高温超伝導ヘリカル・ダイバータコイルの検討

High-Temperature Superconducting Helical Divertor Coils for Heat Flux Reduction in FFHR

柳 長門, 三戸利行, 後藤拓也, 田中照也, 今川信作, 相良明男 (NIFS)

YANAGI Nagato, MITO Toshiyuki, GOTO Takuya, TANAKA Teruya, IMAGAWA Shinsaku, SAGARA Akio (NIFS)

E-mail: yanagi@LHD.nifs.ac.jp

1. 研究の背景

大型ヘリカル装置 LHD における優れたプラズマ閉じこめ実験の進展を受けて、ヘリカル(ヘリオトロン)型核融合エネルギー炉 (FFHR) の設計が物理および工学の両面から鋭意進められている [1]。この装置の巨大な超伝導ヘリカルコイルでは、経験磁場 13 T 以上において電流値 100 kA の導体が要求されるが、これに高温超伝導 (HTS) 線材を適用する可能性についても先駆的な検討を行っている [2]。今回、メインのヘリカルコイルの隣に補助的なヘリカルコイルを設ける提案も行っており、これに HTS 導体を適用する可能性について新たに検討を開始した。

2. ヘリカル・ダイバータコイルによる熱負荷低減

磁場閉じこめ核融合炉の実現のためには、多くの物理および工学課題があるが、このうち、閉じこめ領域から磁力線が外部に出てくるダイバータにおいてプラズマ粒子による大きな熱負荷をいかに受け止めるかは、最重要課題のひとつである。現状の設計では、熱負荷は 10 MW/m^2 のレベルに達すると予測され、これに耐える材料開発が行われているが、中性子を伴った長時間の照射でどうなるか等、未解明の課題も多い。そこで、実効的な熱負荷を軽減する方策についても検討されており、そのひとつに、ダイバータ磁力線のストライクポイントを時間的にスイープする方法がある。今回、ヘリオトロン磁場配位においてメインのヘリカルコイルの両脇に「ヘリカル・ダイバータコイル」(仮称)を設置し、メインのヘリカルコイルの 2~3% 程度の電流を交流に振ることで、ダイバータ・スイープを行う方法を新たに提案した。これによって、時間平均したダイバータ熱負荷は 1 MW/m^2 以下となり、現在の基本設計と比べて大幅な低減が期待できる。図1に、FFHR の磁気面と時間変化させたダイバータレッグの断面図、および、超伝導コイルシステムを上から見た図を示す。ここで、ヘリカル・ダイバータコイルは、ポロイダル方向にスプリットされたヘリカルコイル [3] であり、メインのヘリカルコイルの支持構造の中に収めることができる。

3. ヘリカル・ダイバータコイルの HTS オプション設計

現在の FFHR の基本設計では、メインのヘリカルコイルは、大半径が 16.74 m、プラズマ中心におけるトロイダル磁場は 4.9 T であり、1本あたり 37.9 MA の電流が必要とされる。その 2%分を時間的に変化させる場合、ヘリカル・ダイバータコイルに要求される全電流は約 750 kA となり、30 kA の導体を 25 ターン用いることで構成できる。これを周波数 0.5 Hz で正負にスイープする仕様において、HTS 線材を適用することは有望と考えられる。現在の基本案としては、Y 系テープ線材を単純に積層あるいは長いピッチの撚線構造として、ステンレス製ジャケットに収める構造を想定している。これらの案にもとづき、すでに、温度 20 K で 10 kA 級を想定した短尺導体試験を行っているが、運転温度をもっと高くする案は魅力的であり、今後、60 K で 30 kA 級をターゲットとして導体の試作開発を行うことを計画している。また、コイルの製作方法としては、ヘリカル半ピッチごとに現地で接続することによって組み立てる方式を考えている [2,3]。併せて、交流運転において予測される損失の評価と冷却方法等に関する検討も行っている。

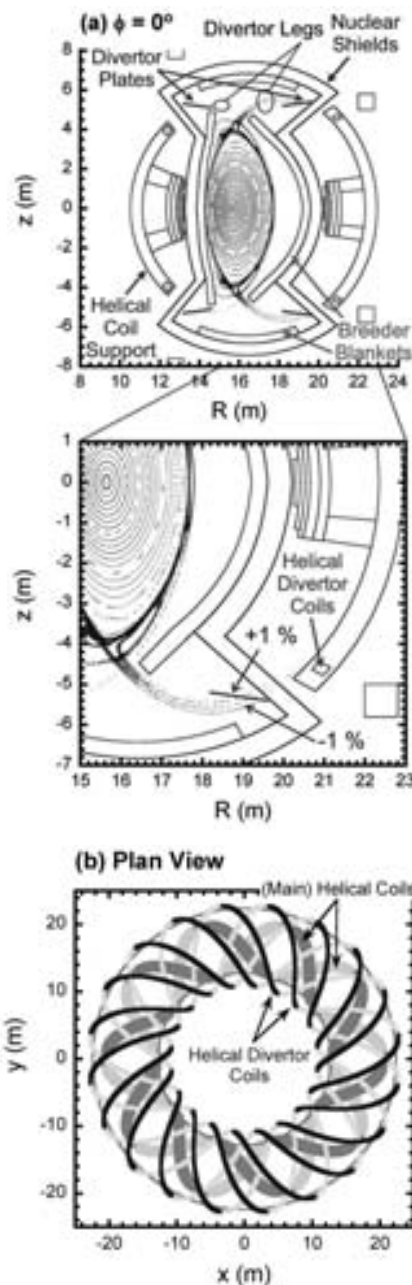


Fig. 1 (a) Vacuum magnetic surfaces and divertor legs of FFHR-2m2 at a toroidal cross-section of $\phi = 0^\circ$, including the $\pm 1\%$ amplitude of field changes provided by the helical divertor coils. (b) A plan view of the coil system.

参考文献

- [1] A. Sagara et al., Fusion Eng. Des. **81** (2006) 2703.
- [2] G. Bansal et al., Plasma and Fusion Res. **3** (2008) S1049.
- [3] N. Yanagi et al., Plasma and Fusion Res. **5** (2010) S1026.

高温超電導線材の中性子照射実験

Neutron irradiation effects of high temperature superconductors

神林 佑, 青木 徹, 植田 浩史, 石山 敦士(早大); 鹿島 直二, 長屋 重夫(中部電力); 宮原 信幸(放医研)

KAMBAYASHI Yu, AOKI Toru, UEDA Hiroshi, ISHIYAMA Atsushi (Waseda University);

KASHIMA Naoji, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power Company); MIYAHARA Nobuyuki (NIRS)

E-mail: atsushi@waseda.jp

1. 研究背景と目的

近年, 高温超電導線材の高性能化が進み, SMES (超電導磁気エネルギー貯蔵) や Si 単結晶引き上げ装置への応用に向けた研究開発が行われている。さらに核融合や加速器への応用に関する検討もはじまった。しかし, これらの応用の際には放射線環境下での利用を考慮しなければならない。このような環境の下で放射線により機器が放射化することは, メンテナンス時の装置運用や被曝管理, 機器廃棄時の処理といった点で好ましくないため, 超電導線材の放射化特性ならびに耐放射線性を明らかにしていく必要がある。

以上の観点から, 基礎実験として高温超電導線材に中性子線を照射した際の, 照射前後の超電導特性と中性子照射による生成核種を調査したので報告する。

2. 実験

実験には市販の Bi-2223 線材(住友電工製)と YBCO 線材(AMSC 製)の 2 つの超電導線材(諸元は Table 1 に示す)を用いた。放医研サイクロトロンを使用し, 14 MeV のエネルギーを持つ中性子線を室温の下で線材に照射した。線量としては 11 kGy/h で約 7 時間照射し, これを 3 回繰り返して, 総量として約 231 kGy を照射した。

また, 中性子線照射前後の線材について液体窒素冷却下(77 K) で I_c 測定を行うことにより, 超電導特性を評価した。測定の方法としては, 線材を 3 cm ほどの区間に分け, それぞれの区間について照射前と照射後の I-V 測定を行った。

3 回目の照射の 13 日経過後に Ge 検出器による試料からのガンマ線スペクトル測定を行い, 放射線照射による RI 生成物を測定した。

Table 1 Specifications of HTS samples

	sample 1	sample 2
material	Bi-2223	YBCO
manufacturer	Sumitomo, DI-BSCCOType HI	AMSC, 344 Superconductors
process	CT-OP	RABITS/MCO
width	4.4 mm	4.4 mm
length	120 mm	120 mm
thickness	0.22 mm	0.22 mm
I_c (nominal)	140 A	Min 70 A

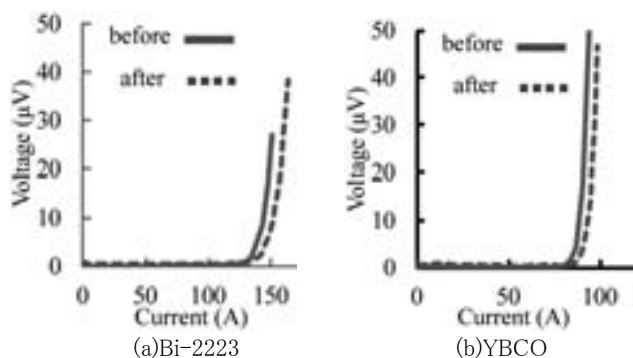


Fig.1 Example of I-V measurements

Table 2 I_c and n-value of samples

Type (section)	Before Irradiation		After Irradiation					
			77kGy		154kGy		231kGy	
	I_c	n 値	I_c	n 値	I_c	n 値	I_c	n 値
Bi-2223(End to end)	146.0	16.4	130.2	16.0	149.6	19.0	150.5	18.0
YBCO(End to end)	90.0	25.2	93.0	23.6	93.8	27.0	93.7	24.0

Table 3 Induced RI

(a) Bi-2223

Half-life (day)	nuclide	Radioactivity (Bq/g)
6.24	²⁰⁶ Pb	999.6
8.46	¹⁰⁶ Ag	7629.2
41	¹⁰⁵ Ag	1880.6
249.79	¹¹⁰ Ag	3907.1
250.4	¹¹⁰ Ag	0.3
11513.75	²⁰⁷ Pb	7.3

(b) YBCO

Half-life (day)	nuclide	Radioactivity (Bq/g)
8.46	¹⁰⁶ Ag	329.9
11.5	¹¹³ Sn	57.5
13.6	¹¹⁷ Sn	1073.5
41	¹⁰⁵ Ag	86.9
44.5	⁵⁹ Fe	23.9
70.92	⁵⁸ Co	9360.3
77.27	⁵⁶ Co	88.0
106.65	⁸⁸ Y	32.5
249.79	¹¹⁰ Ag	330.1
271.79	⁵⁷ Co	2333.5
312.12	⁵⁴ Mn	52.6
1923.55	⁶⁰ Co	90.9

3. 結果

測定した I-V 特性を Fig.1 に, I-V 特性から得られた I_c (1 μ V/cm 基準) と n 値を Table 2 に示す。図より, 照射前後で I_c , n 値ともに大きく変化していない。Table 3 に 77 kGy 照射時に生成したガンマ線放射性核種ならびにその由来元素を示す。Bi, Y 系線材共に RI 生成物は数種類あったが, RI 生成物の総量は少なく, 照射 2 週間後の表面放射線は問題の無いレベルであった。

本実験では液体窒素中で I_c 測定をした後, 室温で中性子を照射し, 再び液体窒素中で I_c 測定を行った。今後はこのような Thermal cycle をなくし, より実際の運転環境に近づけるために, 冷凍機伝導冷却下で中性子照射実験を行う予定である。また照射前後の機械特性も評価する予定である。

4. 参考文献

1. Hiroshi Ueda, Atsushi Ishiyama, Nobuyuki Miyahara, Naoji Kashima, and Shigeo Nagaya, "Estimation of Radiation damage in High-temperature Superconductors," IEEE Trans. on Applied Superconductivity, no.19, vol.3, pp.2872-2876, 2009

交流磁界発生用超電導マグネットの運転電流

Operating current of superconducting AC magnet

海保 勝之, 岡野 真, 淵野 修一郎 (産総研)

KAIHO Katsuyuki, OKANO Makoto, FUCHINO Syuichirou (AIST)

E-mail: k-kaiho@aist.go.jp

1. はじめに

超電導コイルで発生する電磁力を利用した人工震源の開発を行っている。そこで使われる YBCO 薄膜超電導テープを用いて製作された 1 パンケーコイルに 50Hz の正弦波電流を流した場合における運転電流の安定性について考察を行った。流せる電流の大きさはコイルが曝される磁界の大きさ、方向の他に、交流損失による温度上昇によって制限される。ここでは、交流損失による温度上昇の影響について理論的検討を行った。交流損失が最も大きくなるのは垂直磁界が大きいパンケーコイル巻き線中央付近と考えられる。垂直磁界がテープ状超電導体の中心部まで侵入していないと仮定し、交流損失と冷媒の冷却特性の熱バランスを考慮して、熱的安定性の検討を行った。

2. 交流損失と冷却の熱バランス条件

超電導テープはエッジ冷却されているとして、断面の温度分布が Fig.1 に示すようになっていっていると近似する。

超電導体エッジ面から冷却される熱量 Q 、および超電導テープにラップされた電気絶縁体中の温度上昇分 ΔT_i は、それぞれ (1)、(2) 式のようにになる。

$$Q = Ph(T - \Delta T_i - T_0) \quad (1)$$

$$\Delta T_i = k \cdot L \quad (2)$$

但し、 P は冷却周囲長、 h は熱伝達係数、 T は超電導体の温度、 T_0 は冷媒の温度、 k は電気絶縁体の熱伝導係数と厚みに関係した定数、 L は交流損失の値である。

超電導テープの厚みを d とすれば、 $Q = d \cdot L$ より、交流損失と冷却の熱バランス条件は (3) 式のようにになる。

$$h(T - T_0) = \left(\frac{d}{P} + h \cdot k \right) L \quad (3)$$

3. 交流損失による温度上昇の計算

外部垂直磁界成分を H 、 m を定数、 J_c を臨界電流密度とすれば、交流損失は $L = m \cdot H^3 / J_c$ のように表される。 J_c の温度依存性 (4) 式、および (3) 式より、超電導体の温度上昇は (5) 式のように計算される。

$$J_c = J_{c0} \left(1 - \frac{T - T_0}{T_c - T_0} \right) \quad (4)$$

$$T - T_0 = \frac{T_c - T_0}{2} \left(1 - \sqrt{1 - 4m \frac{(d + Phk)H^3}{J_{c0} Ph (T_c - T_0)}} \right) \quad (5)$$

但し、 T_c は超電導体の臨界温度。

4. 交流磁界と温度上昇の限界

Fig.2 は (3) 式の両辺の温度依存性を示している。 H の値が大きくなるにつれ、(5) 式で表される温度上昇の値が大きくなるが、 H 、 T の限界は (5) 式の値が実数になる限界より (6) 式のようにになる。

$$H \leq \left(\frac{J_{c0} h (T_c - T_0)}{4m \left(\frac{d}{P} + hk \right)} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

$$T - T_0 \leq \frac{T_c - T_0}{2} \quad (7)$$

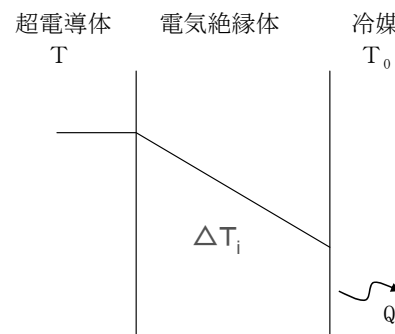


Fig.1 Temperature profile

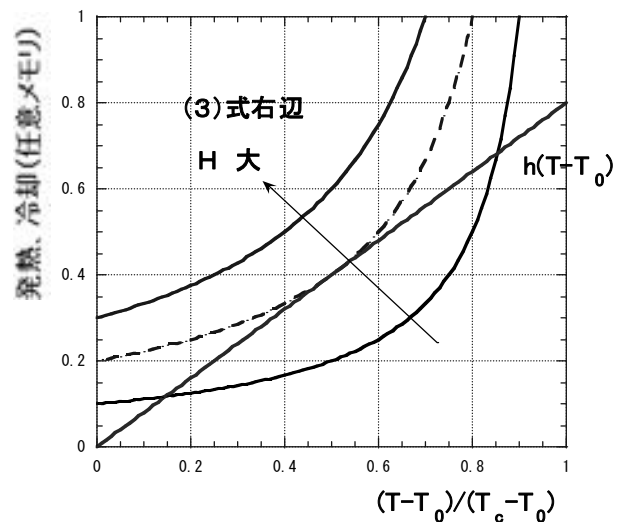


Fig.2 Heat balance dependence on AC magnetic field

5. まとめ

YBCO 薄膜テープを用いて製作されたパンケーキ型コイルの安定性に影響する、交流損失による温度上昇について考察した。垂直磁界に対して、交流損失は臨界電流に反比例するため、熱バランスの関係から温度上昇は $(T_c - T_0) / 2$ が限界となる。

参考文献

- M, Okano et al.: 電磁力ダイナミクス (SEAD22) 5月19～21日 (2010) 発表予定

超伝導磁気浮上を適用したフォトマスク洗浄プロセス用 非接触スピン装置の研究開発

Research and Development of Non-contact Spin Processor Applying Superconducting Magnetic Levitation for Cleaning Process in Photo Mask Production

福井 聡, 風間 亨介, 小川 純, 岡 徹雄, 佐藤 孝雄(新潟大); 反町 聡, 斉藤 君世, 宮崎 紳介(MTC)
 FUKUI Satoshi, KAZAMA Ryosuke, OGAWA Jun, OKA Tetsuo, SATO Takao (Niigata University);
 SORIMACHI Satoshi, SAITO Kimiyo, MIYAZAKI Shinsuke (MTC)
 E-mail: fukui@eng.niigata-u.ac.jp

1. はじめに

半導体フォトマスクなど半導体関連の製造プロセス（ウェットプロセス）ではスピン処理装置（スピンコーターや洗浄装置など）を用いる。このスピン処理装置の回転軸受から微粒子状ダストの放出が起これ、フォトマスク等対象物周囲のクリーン度が低下する。その結果、微粒子ダストがパターン間に混入して、パターン形成不良を引き起こし、製品の低品質化或いは生産歩留まり低下の原因となっており、この問題の解決が切望されている。この問題を解決するためには、スピン処理装置のターンテーブル部分をクリーンベンチ内に完全隔離できる非接触スピン処理装置の開発が必要不可欠である。本グループでは、上記問題点を解決する方法として、高温超伝導バルクを用いた磁気浮上に着目し、これをスピン処理装置に適用するための共同研究開発を行っている[1]。本稿では、試作した要素試験装置の概要と浮上回転試験結果について報告する。

2. 要素試験装置の設計・試作・試験

実用化開発に先立ち、小型の要素試験装置を設計・試作した。Fig. 1 に試作した要素試験装置の概略図を示す。中空同心円筒型のステンレス製チャンバ内に銅製冷却板を設置し、冷却板に HTS バルク(Gd系 直径 60mm×厚さ 10mm)6 個を埋め込む。冷却板の一端に一段 GM 冷凍機を接続し、30K 付近まで冷却して運転する。直径 220mm のアルミ製ターンテーブルに直径 190mm のネオジウム永久磁石の磁気回路を埋め込み、HTS バルクと対向させて磁気浮上系を構成する。これまでの研究で、浮上高の向上には、半径方向に着磁した永久磁石をカスプ配置した構造が有利であることがわかっている[2]。そこで、本試験機の浮上用磁石にも同様の構造を採用した。ターンテーブル中央部分及びクライオスタット架台に固定した DC サーボモータに連結した回転フランジのそれぞれに、磁気カップリングを取付けて非接触でターンテーブルを駆動する。磁気カップリングの必要伝達トルクは、必要な回転加速 1500 rpm/s とすると、2.4 Nm となる。これを満足する磁気カップリングの構造を有限要素解析により設計した。

Fig.2 に、浮上回転試験における、ターンテーブルの水平及び垂直方向の変位の時間波形の一例 (2000rpm/3s) を示す。なお、本研究は、科学技術振興機構「委託開発」による支援のもとで実施している。

Tab 1 Specification of test spinner

Rotational speed	2000 rpm (Max. 3000 rpm)
Acceleration ($ d\omega/dt $ (rad/s ²))	~1500 rpm/s (157.5 rad/s ²)
Diameter of turn table	220 mm
Weight of turn table	2.5 kg
Levitation height	5-10 mm
Necessary transfer torque	2.4 Nm
Capacity of drive motor	1 kW
Load	0 kg
Acceptable vibration	Not designed
Operating temperature	30 K

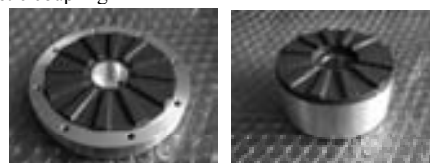
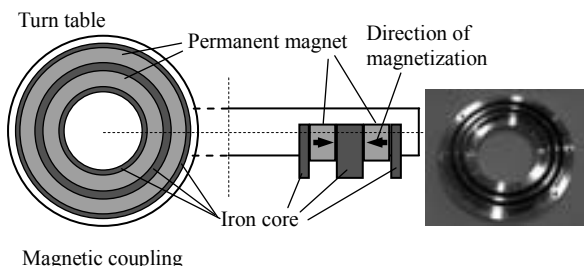
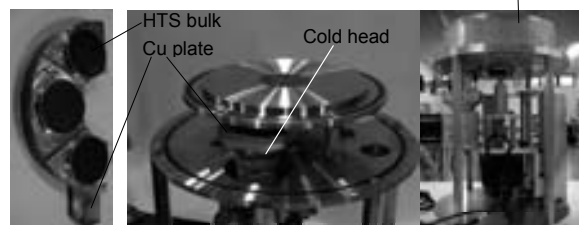
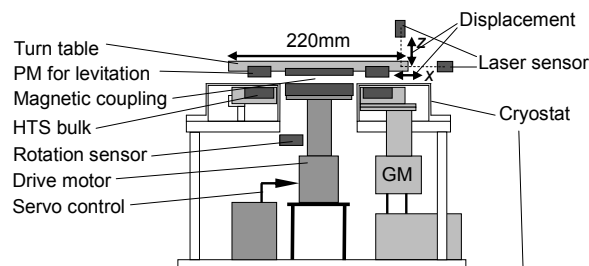


Fig. 1 Schematic illustration of test spinner.

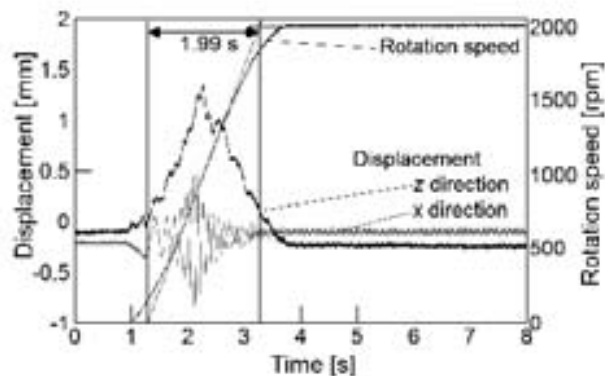


Fig. 2 Average acceleration : 2000 rpm/3 s

参考文献

1. S. Fukui, et al., : Abstracts of CSJ Conference, Vol. 77 (2007) p.179.

磁気力を利用した重力制御環境でのタンパク質結晶成長 —対流のシミュレーション—

Protein crystal growth in gravity controlled by magnetic force —Simulation of the convection—

岡田秀彦, 廣田憲之, 松本真治, 和田仁 (物質・材料研究機構)
Hidehiko Okada, Noriyuki Hirota, Shinnji Matsumoto, Hitoshi Wada (NIMS)

1. 緒言

新薬などの開発において、従来の経験的な方法に代わり、タンパク質の立体構造を基にして有用な薬剤分子を設計・作製する方法が注目されている。タンパク質の立体構造を解析・決定する方法として X 線回折が良く用いられているが、そのためには良質な結晶が必要である。しかし、タンパク質結晶の質 (結晶性) は製作の際の多くの因子に左右され、現状では良質な結晶を効率よく得ることは非常に難しい。一つの方法として結晶化過程で対流や容器壁への接触等を抑制できる微小重力環境が注目され、スペースシャトルを使ったタンパク質結晶化実験が行われて幾つかの良質な結晶が得られている。しかし、宇宙空間での実験は、装置や実験条件、費用、時間等に制約され、簡単には行うことができない。タンパク質の反磁性と磁気力を利用して擬似的な微小重力環境下でも同様な効果があるとされ、研究が進められてやはり良好な結果が得られている。

本研究は、磁場環境と微小重力環境との違い等を計算機シミュレーションによって調べ、タンパク質結晶作成に適した磁場環境を提供する超電導マグネットの製作に寄与する事を目的としている。

2. シミュレーションの概要

重力及び磁場が存在する場合の流体に対する Navier-Stokes 方程式は以下の様に書ける。

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + (\bar{u} \cdot \bar{\nabla}) u_i = -\frac{1}{\rho} \bar{\nabla}_i p + \nu \bar{\nabla}^2 u_i + g_i + \frac{1}{\rho} (\bar{M} \cdot \bar{\nabla}) H_i \quad (1)$$

u は流速、 ρ は流体の密度、 p は圧力、 ν は粘性、 g は重力、 M は流体の磁化、 H は外部磁場である。温度も同様でないので、この式と次式のエネルギー輸送の方程式を連立させて解く。

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \bar{u} \bar{\nabla} T = \bar{\nabla} (k \bar{\nabla} T) \quad (2)$$

T は温度、 C_p は等圧比熱、 κ は熱伝導率である。重力と磁気力は以下を介して対流等の流体现象に影響を与える。

- ① 温度変化による流体の体積膨張
- ② 温度変化による磁化の変化
- ③ 磁場の不均一

また、上面を自由界面とし表面張力の効果も取り入れているので Marangoni 対流も考慮している。

本シミュレーションでは以上を COMPACT (INOVATIVE Research INC.) を用いて 2次元で解いている。

3. シミュレーションの結果

20°Cの純水を結晶化容器に入れ、その容器が超電導マグネットの磁気力を受けていると想定して、シミュレーショ

ンの条件を設定した。磁気力は水に対して上向きに作用しているとして、幾つかの条件でシミュレーションを実施した。水の磁気浮上条件での対流の例を図1に示す。また、底面は他の面よりも温度が 0.1°C 高くなっている。

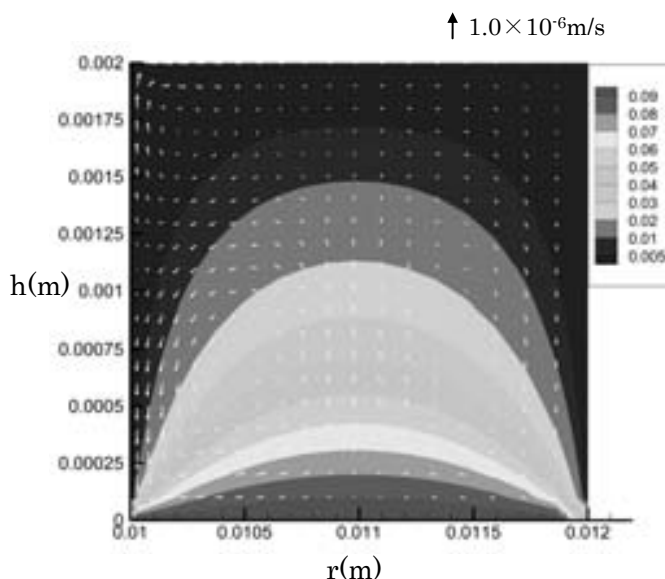


図1 磁気浮上条件での、水の対流と温度分布

図1のシミュレーションの結果から、水の磁気浮上条件でも対流は消えない事が分かった。また、他の結果からも、磁場による微小重力は宇宙での微小重力とは異なる現象を生じる場合がある事が分かった。

4. まとめ

タンパク質の磁場中での結晶化をシミュレートするために、溶液の対流現象のシミュレーションを行い、温度、重力、磁気力等の影響を調べた。定性的には対流等の現象を再現している事が分かった。また、溶液 (水) の重量磁化率の温度依存性の影響は体積膨張と同程度にあるため、磁気浮上条件では、対流が大きく抑制されるわけではない。また、磁気力の変動も流体の動きに影響を与える事が分かった。

本研究の一部は科学技術振興機構「先端計測分析技術・機器開発事業機器開発プログラム 高効率・高品位タンパク質結晶生成システムの開発」の支援を受けて実施している。

光ファイバ温度センサの極低温下における 測定再現性・多点温度測定特性について

Repeatability and Multipoint Measurement Characteristics of Optical Fiber Temperature Sensors under the Cryogenic Temperature

長嶋 賢, 田中 芳親, 水野 克俊, 小方 正文 (鉄道総研)
NAGASHIMA Ken, TANAKA Yoshichika, MIZUNO Katsutoshi, OGATA Masafumi (RTRI)
E-mail: ken@rtri.or.jp

1. はじめに

超電導磁石の状態監視の手段として、内部の温度測定が考えられる。光ファイバ温度センサは熱侵入が少なく、電氣的絶縁性、耐電磁ノイズ性が高いなど超電導機器に好適であると考えられるが、極低温での特性が充分把握されていなかった。従来の検討で、光ファイバ温度センサの極低温での測定特性を確認したが[1]、未実施だった再現性と多点同時測定の確認を行ったので、以下に報告する。

2. 再現性確認試験

再現性の確認試験は、通常の FBG 光ファイバ温度センサ (以下、FBG センサ) を利用し、室温から極低温までの冷却・昇温を 2 回繰り返して両者の結果に差異がないかを評価した。

2-1. 試験方法

FBG センサは、米 Corning 製光ファイバ SMF28 に、スイス Technica 社で FBG を 5 点加工したものを使用した。試験は、極低温試験装置内の冷却ベース板に、FBG センサの FBG 点全点を接触させた。冷却ベース板には、比較対照用のセルノックス抵抗温度センサを設置した。

試験は、室温から 10K まで冷却し、温度調節により 25K, 50K, 75K で固定した後、窒素ガスを導入して室温まで強制昇温させるサイクルを 2 回繰り返した。温度実測値と FBG 波長シフトの測定は、両サイクルの温度調節時の安定後と、2 回目の冷却、昇温時に行った。

2-2. 試験結果

測定結果は Fig. 1 に示すように、冷却時と 2 回実施した温度調節時のデータは 2% 程度以内の誤差で一致していた。しかし、冷却時に測定値がドリフトする結果が見られる。これは、FBG センサの熱伸縮と固定による摩擦に伴う、張力の変動があったため考えられる。また、強制昇温時は冷却時と異なる結果を示している。これは、強制昇温時は真空でないことから、FBG センサへの熱伝達状況が変化したことにより起きていると推定される。こうしたことから、再現性の厳密な確認をするまでには至っていない。再現性は、張力を与えず伝熱を確保できる固定方法を確立した後に詳細に確認する必要がある。

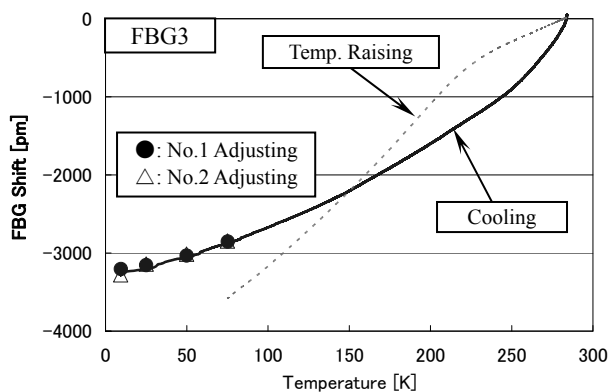


Fig.1 Result of Repeatability Measurement

3. 多点同時測定試験

FBG センサは、同時に多点測定が可能であることを特長としているが、多点同時測定が極低温下でも問題なく実施できるかどうかを検証するため、確認試験を実施した。

3-1. 試験方法

使用した FBG センサは、再現性確認試験と同一のものである。測定対象は、超電導磁石を模擬した極低温試験装置とし、内部の超電導コイル模擬体、輻射シールド板、外槽容器に接した部分など、それぞれ温度の異なる 5 点を測定した。試験装置は室温から極低温まで冷却し、その後室温まで昇温させて各測定点を連続的に測定した。また、極低温冷却時にヒータ等の操作によって一部の温度を変化させ、特定の FBG 点の測定値変動による、他点の測定値への影響の有無についても確認を行った。

3-2. 試験結果

測定の結果、温度の異なる多点の同時測定は、室温から極低温まで問題なく実施できていた。また、FBG 波長シフトは Fig. 2 に示すとおり、温度実測値が変化している箇所では温度実測値と同様の変化を示していた。このような結果から、FBG センサは別の FBG 点の影響を受けずに、多点同時測定が可能であることが確認できた。

4. まとめ

FBG センサを極低温測定に適用した場合の、測定再現性と多点同時測定の特性を確認した。多点同時測定は問題なく実施できる見込みが得られたが、再現性は厳密な確認を行うデータが得られなかった。FBG センサへの熱伝達を確保でき、張力に影響を与えない固定方法が課題として残っており、固定方法を確立したうえで詳細に確認する必要がある。

本研究の一部は、国土交通省の国庫補助金を受けて実施した。

参考文献

1. Y. Tanaka, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 80 (2009) p.151

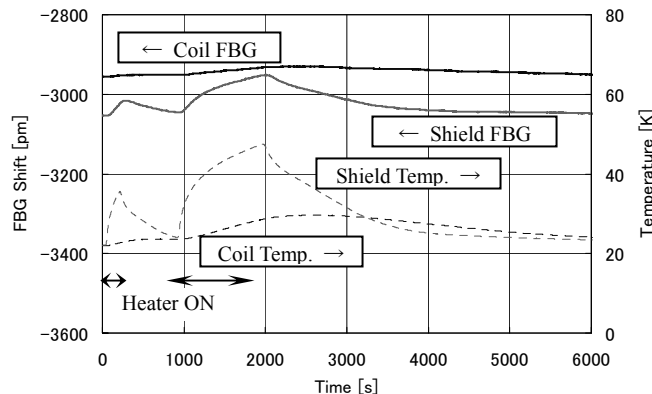


Fig.2 Result of Multipoint Measurement

極低温特性改良光ファイバ温度センサの試作と試験について

Experimental Examination of Optical Fiber Temperature Sensors That Improved Cryogenic Temperature Characteristics

田中 芳親, 長嶋 賢 (鉄道総研); 寺田 佳弘, 奥村 昌平 (フジクラ)

TANAKA Yoshichika, NAGASHIMA Ken (RTRI); TERADA Yoshihiro, OKUMURA Shohei (FUJIKURA Ltd.)

E-mail: 44tanaka@rtri.or.jp

1. はじめに

光ファイバ温度センサの極低温測定への適用を目指し、極低温、強磁場下での測定特性試験を行ってきた。その結果、極低温における温度分解能低下が課題であることが明らかになった[1]。このため、極低温での温度分解能向上の方策を検討し、この方策に基づいて感度を改良できる FBG 光ファイバ温度センサ(以下、FBG センサ)を試作し試験したので、これらの状況、結果を報告する。

2. 感度向上の検討・試作

FBG センサは、光ファイバの素線に周期的に屈折率を変調させた干渉格子を形成しており、この格子間隔や屈折率の熱伸縮に伴う変化を、干渉格子からの反射光波長を測定することにより計測している。しかし、素線の材料である石英ガラスは、極低温における線膨張率が低いために、格子間隔変化が小さくなり感度が低下する。一般的な光ファイバは、Fig. 1 のように素線の表面にコーティングが施されている構造であるため、このような構造の線膨張率 α は(1)式のように表される。

$$\alpha = \frac{A_1 E_1 \alpha_1 + A_2 E_2 \alpha_2}{A_1 E_1 + A_2 E_2} \quad (1)$$

A は断面積, E はヤング率, 添え字の 1 は光ファイバ素線, 2 はコーティングの材料を示す。

(1)式から、線膨張率とヤング率の大きな材料を適切な断面積比でコーティングすることにより、熱伸縮増大が図れることが明らかであり、コーティングを工夫することにより極低温の感度向上を図ることとした。

コーティング材料は、線膨張率の大きいアクリル樹脂 (PMMA) とヤング率の大きいニッケルで検討することとした。コーティングの外径は加工の制約などから PMMA が 0.5mm, ニッケルが 0.2mm とした。Table 1 にガラス, PMMA およびニッケルの極低温での線膨張率の代表値, ヤング率, 断面積を示す。ヤング率は、一般に極低温でも大きく変化しないため、室温の値を利用した。これらの値から、FBG センサの測定値と温度の関係を予測した。予測結果は Fig. 2 の破線のようになった。この予測より、点線に示す従来の FBG センサより感度向上の見込みが得られたため、PMMA とニッケルを前述の外径になるようコーティングした FBG センサを試作した。

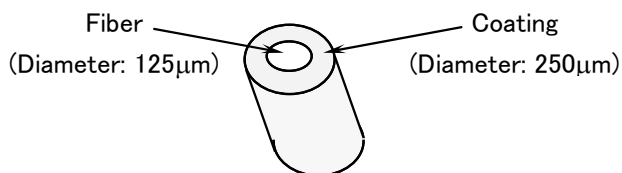


Fig.1 Schematic View of Optical Fiber Construction

Table 1 Properties of Materials

	Glass	PMMA	Ni
Linear Expansion Coefficient (@50K) [$10^{-6} / K$]	0.054[2]	16.2[2]	1.7[3]
Young's Modulus [GPa]	70	3.3	207
Cross Section [mm^2]	0.012	0.184	0.019

3. 試験実施および結果

試作 FBG センサの FBG 測定点は、極低温試験装置内の冷凍機に接続した冷却板に全点接触させた。冷却板には、比較対照用セルノックス抵抗温度センサを設置している。

試験は、室温から 10K まで 40 時間ほど掛けて冷却し、温度調節により 25K, 50K, 75K で固定した後、室温まで 50 時間ほど掛けて昇温させるサイクルを 2 回繰り返す、FBG 反射波長は連続的に測定した。

FBG 測定結果は Fig. 2 の実線のようになった。測定値は、PMMA コーティングでは予測値と概ね一致していたが、ニッケルコーティングでは予測値ほど変化しない結果となった。再現性に関し、ニッケルコーティングは繰り返し測定でほぼ同じ結果が得られており、再現性が高いと判断できた。しかし、PMMA コーティングは測定値の変動が見られるなど、再現性が高いと判断できる結果を明確に得ることができなかった。

4. 考察・まとめ

Fig. 2 より、PMMA コーティングは感度を向上効果が大きいと見込まれ、試験でも概ね予想どおりの効果が確認できた。しかしニッケルコーティングでは、測定実測値が予測値と一致していない。ニッケルでもコーティング厚を増加させれば感度向上効果が見込まれるが、FBG 波長変移変化の実験値が予測値より小さかった原因を究明する必要がある。

PMMA コーティングの測定値変動、再現性低下については、FBG センサの熱収縮と固定に伴う摩擦に起因する、張力変動に影響されていると考えられる。また、PMMA はニッケルに比べ熱伝導率が低いため、FBG センサの熱伸縮で測定対象との接触状態が変化し、FBG 測定点への伝熱量が低下して、測定値が変動した可能性も推定される。FBG センサの固定方法と熱伝導率向上については、今後の課題である。

本研究の一部は、国土交通省の国庫補助金を受けて実施した。

参考文献

- Y. Tanaka, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 80 (2009) p.151
- THRMOPHYSICAL PROPERTIES OF MATTER Vol. 13, IFI/Plenum, (1977) p.1369, p.1470
- THRMOPHYSICAL PROPERTIES OF MATTER Vol. 12, IFI/Plenum, (1975) p.225

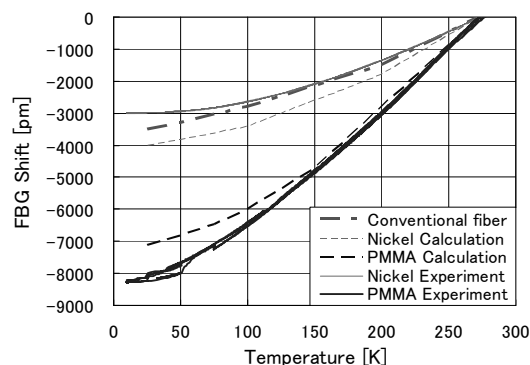


Fig.2 Measurement Results of FBG Wavelength Shift

TDM 方式 FBG 光ファイバセンサによる極低温下の多点温度計測試験

Experimental study on multi-point cryogenic measurement using TDM based FBG optical sensors

田村 琢之, 上明戸 昇 (飛鳥建設技術研), 田中 芳親, 長嶋 賢 (鉄道総研), 寺田 佳弘, 奥村 昌平 (フジクラ)

TAMURA Takuyuki, KAMIAKITO Noboru (Tobishima Corporation), TANAKA Yoshichika, NAGASHIMA Ken (Railway

Technical Research Institute), TERADA Yoshihiro, OKUMURA Shohei (Fujikura Ltd.)

E-mail:takuyuki_tamura@tobishima.co.jp

1. はじめに

熱伝導性が小さいガラスを素材とする光ファイバセンサは、光ファイバを通じた外部からの熱の侵入が少ないことから、極低温下で利用可能な計測技術の一つと考えられる。さらに、電気絶縁性が高く、電磁場の影響を受けないという特長を持つため、超電導状態を維持する極低温下での、温度計測の検証を目的とした適用試験が行われている[1]。本稿では、時間分割多重化(Time Division Multiplexing)方式によるFBG光ファイバ温度センサが、極低温域で温度変化に対する感度を持つことを確認するとともに、常温を含む広い温度範囲で、多点の温度計測が可能であることを検証した試験結果を報告する。

2. FBG センサと多重化の原理

FBGは、光ファイバ上に形成した、通常長さ1cm程度の回折格子で、光源から光ファイバ内への入射光に対し、特定の波長成分の光を反射する。反射光の波長は、ひずみや温度の変化に応じてシフトするので、シフト量を計測することにより、FBGはひずみや温度のセンサ機能を果たす。

FBGセンサによる計測では、主にCバンドと呼ばれる1,530~1,570nm(ナノメートル)の限定された波長帯付近を使用するため、適用方法により、計測可能なひずみや温度の変化幅には限界が生じることがある。極低温の計測についても、常温に至るまでの広い温度変化を含める場合、FBGセンサは、約300Kの温度計測範囲をカバーする必要がある。これを、1本の光ファイバ上に配置した複数のFBGセンサで計測する場合、波長軸上で多重化を行うWDM(Wavelength Division Multiplexing)方式では、各FBGセンサに割り当てる波長帯の重複を避ける必要があり、計測点数の増大に限界がある。一方、時間軸上で多重化を行うTDM方式は、波長帯の共用が可能であり、計測波長幅の減少がない[2]。よって、多点計測におけるFBGセンサの多重化技術としてTDM方式を用い、極低温から常温までの温度変化過程も含めた計測試験を行い、適用性を検証した。

3. 計測試験内容

既往の試験結果[1]より、極低温下ではFBGセンサの感度が低下することが知られているため、FBGセンサは、アクリル(PMMA)被覆を通常の2倍の500 μ mの厚さにしたものと、金属のうち比較的熱膨張が大きいニッケルで被覆したものの2種類を使用した。この2種類のFBGセンサを5つずつ製作し、

種類毎に直列に接続したものを、低温容器内の伝熱板上に設置し、冷凍機から伝熱板を通じて、温度変化を与えた(Fig.1)。なお、比較のため、最後尾に通常の被覆厚のFBGセンサも接続した。波長を計測する光計測器には、英国インセンシス製FSIユニットを用い、6つのFBGセンサの波長データを10秒間隔で取得した。

これらのFBGセンサを常温付近から10Kまで冷却した時の、波長の変化をFig.2,3に示す。波長データは、すべてのFBGセンサで欠測なく得られており、また、若干のばらつきが見られるものの、温度の低下にともない、波長が低下していく状況が観測された。ニッケル被覆のFBGセンサの感度は、通常のFBGセンサと同程度であったが、厚いアクリレート被覆のFBGセンサはそれらよりも感度が高く、10~50Kで2~28pm/K、平均で13.4pm/Kであった。波長の最小読取値は1pm(ピコメートル、=10⁻³nm)なので、極低温下でも0.1K以下の分解能で温度計測ができることを示している。また、常温から極低温への温度変化に対する波長の変化幅は、約8,000pmであった。WDM方式を用いて、各FBGセンサの波長帯を重複させずに同じ計測を行う場合、6つのFBGセンサ全体の波長幅はCバンドの幅と同程度となり、1本の光ファイバによる計測点数に限界があるが、TDM方式を用いる場合では、それぞれのFBGセンサが広い波長幅を利用しながら、全体でも同等の波長範囲で同時に計測可能なことを確認した。

4. おわりに

TDM方式を用いたFBGセンサは、WDM方式と同様に、常温までの温度変化を含め、極低温下の温度計測が可能であることを示した。また、TDM方式固有の課題はとくに見られなかった。なお、WDM方式も含め、極低温付近の波長計測値の一部に他と異なる挙動が見られており、センサ設置状態を考慮した極低温下における光学的特性の変化を解明することが、今後の課題であると考えられる。

本研究の一部は、国土交通省の国庫補助金を受けて実施した。

参考文献

1. Y. TANAKA, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 80 (2009) p.151
2. Glynn Lloyd, et al.: Optics Communications, Vol. 244 (2005) p. 193-197

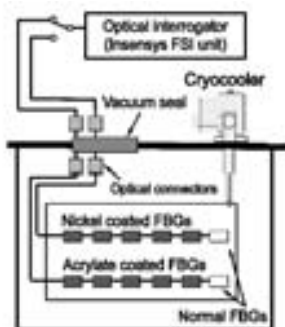


Fig.1 Experimental set-up for TDM-FBG measurement

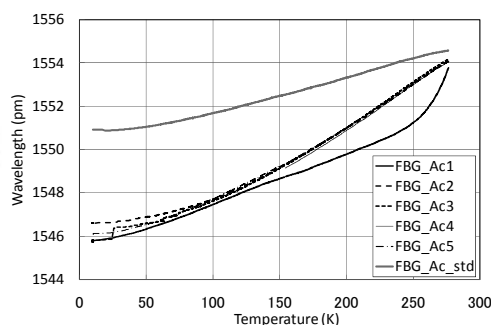


Fig.2 Wavelength shifts of acrylate coated FBGs

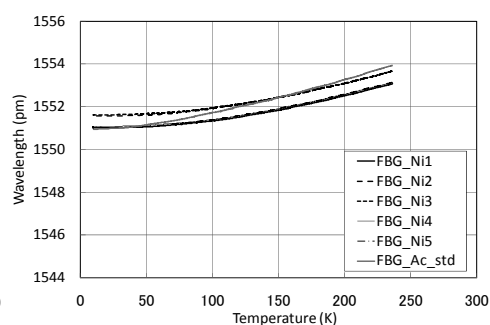


Fig.3 Wavelength shifts of nickel coated FBGs

低温トランスを用いた二段トランスによる HTS-SQUID の 低ノイズ化に関する検討

Noise reduction of HTS-SQUID using cold transformer

北村 善洋, 赤井 友宣, 竹本 真, 廿日出 好, 田中 三郎(豊橋技科大); 田辺 圭一(ISTEC);
荒井 英一, 片山 弘行(JOGMEC)

KITAMURA Y., AKAI T., TAKEMOTO M., HATSUKADE Y., TANAKA S. (TUT); TANABE K. (ISTEC);
ARAI E., KATAYAMA H (JOGMEC)

E-mail: y083813@edu.imc.tut.ac.jp

1. 緒言

我々は HTS-SQUID マグネットメータを用いた地下資源探査技術の研究を行っている。地下資源探査の現場では、SQUID に直接鎖交する磁気ノイズは都市部や研究室の環境より少ないと考えられるが、SQUID・エレクトロニクス間のプローブやケーブルに誘導的に混入する電磁ノイズは携帯電話の普及により同程度存在する場合と考えられる。電磁ノイズが混入すると、ヘッドアンプ中の常温トランスにより SQUID 出力とともに増幅されて、エレクトロニクスに伝達され、システムのノイズを増加させる。そこで、本研究では、SQUID 直近に 77 K の低温トランスを配置して、SQUID 出力をノイズ混入以前に増幅しておき、その後段に増幅率を抑えた常温トランスを配置する二段トランスによるノイズ低減手法を提案する。ここでは最もノイズ増加を抑制できるトランスの組み合わせについて最適条件の検討を行ったので報告する。

2. HTS-SQUID を用いた地中探査システム

本研究では、SQUID を用いた地中探査装置として開発されている時間領域電磁探査法 SQUITEM システムに対して、二段トランス方式を適用して、電磁ノイズによるノイズレベル増加の低減を試みた。このシステムは励磁コイルを用いて地中に磁場を印加し、地中に発生した渦電流による磁場の時間変動を SQUID で検出し、地下の貯留層構造の比抵抗分布を解析する装置である。このシステムの計測部の構成図を Fig.1 に示す。コントローラ、測定の諸操作を行うパソコンが回路ユニットに収納されている。常温トランスを有する FLL 回路と一体になったプローブは電磁シールドケーブルによって回路ユニットと接続されている。このプローブの先端に SQUID 素子を接続するが、二段トランスの場合、プローブと SQUID 素子の間に液体窒素素で冷却される低温トランスを接続する。電源には屋外での探査が主なためバッテリーを使用する。素子には 2 種類の HTS-SQUID マグネットメータ(A,B)を用いた。本研究における実験では磁気ノイズを排除した上で電磁ノイズの影響を調べるため三層ミューメタル磁気シールドケース中で SQUID を液体窒素素冷却した。エレクトロニクスは地下資源探査用に開発された変調型 FLL 回路を使用した。本実験では、トランスの線材には銅線を使用し、コアには低温でも透磁率の変化が少ないアモルファス磁性体ビーズを用いて、低温トランスおよび常温トランスの巻数を変えて数種類用意した。スペクトルアナライザによって SQUID 出力のノイズ特性を測定し、低温トランス、常温トランスの最適条件を検討した。

3. 二段トランスを用いたノイズ特性測定実験

本実験では低温と常温トランスを組み合わせ合わせた増幅率の合計が従来の1段常温トランスの増幅率と同様の 20 倍となる組み合わせを適用した。それぞれの巻数比を調整し、同一の比において巻数を変化させてノイズ特性を計測した。その結果、Fig.2 に示すように、1 段常温トランスを用いたときのノイズレベルが約 260 fT/Hz^{1/2} の SQUID(A)において巻数が 5:50 の低温トランスと巻数が 100:200 の常温トランスを組み合わせるとときにシステムノイズが 185 fT/Hz^{1/2} となり、34%ノイズを低減することができた。1 段常温トランスを用いた時のノイズレベルが 100fT/Hz^{1/2} の高感度な SQUID(B)についても同様に実験を行った。Fig.3 に、高感度な SQUID(B)に 1 段、および 2 段ト

ランスを適用した際の 100Hz~1000Hz 付近のノイズ特性を示す。この素子では低温トランスの巻数が 10:100、常温トランスの巻数 70:140 の場合にノイズレベルは 87fT/Hz^{1/2} となり、従来法と比べ 10%程度ノイズレベルを下げる事ができた。

これらの結果より、二段トランスは電磁ノイズ由来と考えられるシステムノイズの増加を低減して、システムノイズを SQUID 固有のノイズに近づけることができることが示された。一方、素子が異なるときに最適な二段トランスの巻線数が異なるのは、SQUID を含めた二段トランス回路のインピーダンスマッチングをとる必要があり、それぞれの SQUID のインピーダンスやインダクタンスが異なるためと考えられる。

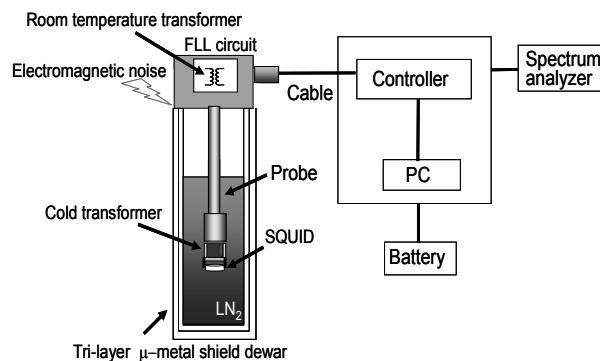


Fig.1 Schematic diagram of SQUITEM system

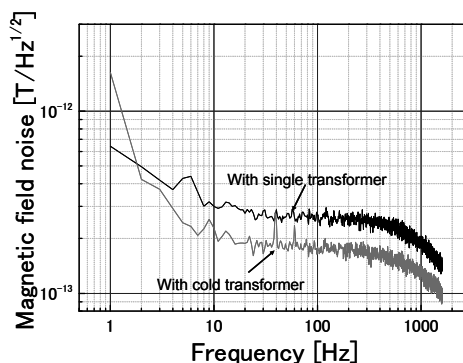


Fig.2 Noise profiles of SQUID(A)

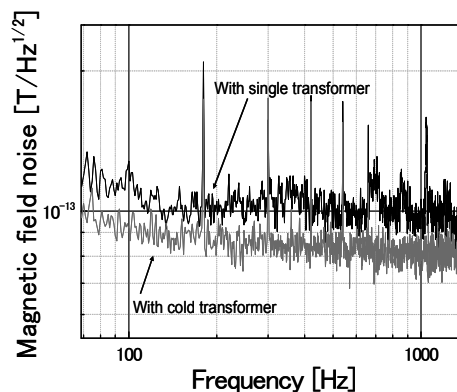


Fig.3 Noise profile of low-noise SQUID(B)

縦溝が設けられた鉛直チャンネル中における超臨界ヘリウムの自然対流伝熱機構 Natural convection heat transfer characteristics of supercritical helium in a vertical channel with riblets.

岡村崇弘 (KEK)

OKAMURA Takahiro (KEK)

E-mail: takahiro.okamura@kek.jp

1. 緒言

超臨界ヘリウム (SHe) を超伝導磁石の冷媒として用いる場合、通常は強制対流冷却方式が用いられるが、盲腸管などの冷却流路においては自然対流伝熱機構を考慮する必要がある。これまで SHe のチャンネル内における鉛直平板自然対流場は、最初 KH 不安定性により横渦が形成され、これらの移流により壁面の滑り無し条件と渦の凍結の運動から横渦はツイスト構造をし、最終的に渦管が纏れ合った乱流状態へ遷移することを報告してきた [1]。こうした乱流遷移過程はチャンネル形状に依存しない統一的な現象であるかを明らかにするために、本報では一例として縦溝 (リブレット) が設けられた矩形チャンネル中における乱流遷移過程をリブレットが無い鉛直平板の場合と比較し、乱流遷移のメカニズムのチャンネル形状依存性を検証する。リブレットは乱流摩擦抵抗の低減を目的に NASA によって開発されたもので、熱流体系というより非熱流体系で頻りに用いられる乱流パッシブ制御法である。リブレットそのものは高速・低速ストリークによる縦渦を抑制することを目的としているが、上記の目的遂行のため本報ではあえて熱流体自然対流系に適用した解析を試みる。

2. 解析系

Fig.1 に例としてリブレットが 4 つ設置された場合 ($n = 4$) における計算領域をチャンネル幅 $z = L_z/2$ で割った半分領域 $\Omega_{3H} \stackrel{\text{def}}{=} [0, L_x] \times [0, L_y] \times [0, L_z/2]$ を示す。実際の計算では Fig.1 の構造をもったチャンネルが $z = L_z/2$ で鏡面対象に位置する矩形チャンネル $\Omega_{3V} \stackrel{\text{def}}{=} [0, L_x] \times [0, L_y] \times [0, L_z]$ を計算領域としている。 $z = 0, L_z$ の面が発熱面であり、ここでは一定温度 $T = T_s$ に保持されている。長さ L_2 、高さ L_3 のリブレットがスパン方向に $0 \leq n \leq 7$ 個設置されており、チャンネル前縁から距離 L_1 の部分にリブレット前縁が位置するように並べられている。リブレットそのものは断熱壁を仮定している。解析では、リブレットの個数 n および設置条件 L_1, L_2, L_3 を種々変えて伝熱特性・渦構造の時間発展を調べる。本計算では主に臨界点近傍 $p_0 = 229 \text{ kPa} > p_c, T_0 = 5.25 \text{ K} < T_{pc}$ (T_{pc} は p_0 における擬臨界温度) に着目するが、熱的緩和過程の特異性が少なく対流が支配的になる次の条件を満足する系を仮定する。

$$|\Omega_{3V}|^{-1} \int_{\Omega_{3V}} p(\mathbf{r}, t) d^3\mathbf{r} \sim p_0 \quad (1)$$

以下に本計算で用いた 3 次元流体基礎方程式を記す。

$$\partial_t \rho + u_j \partial_j \rho = -\rho \partial_j u_j \quad (2)$$

$$\partial_t u_i + u_j \partial_j u_i = -\rho^{-1} \partial_i p + \rho^{-1} \partial_j \tau_{ij} - g e_i \quad (3)$$

$$\partial_t e + u_j \partial_j e = -\rho^{-1} \partial_j q_j - (p/\rho) \partial_j u_j - (\tau_{ij}/\rho) \partial_j u_i \quad (4)$$

$$dp = (\partial p / \partial \rho)_e d\rho + (\partial p / \partial e)_\rho de \quad (5)$$

(5) 式は熱的状態方程式 $p = p(\rho, e)$ の全微分形である。ここで応力テンソル $\tau_{ij} = 2\mu S_{ij} - (2/3)\mu S_{kk} \delta_{ij}$ 、変形速度テンソル $S_{ij} = (\partial_j u_i + \partial_i u_j)/2$ 、熱流ベクトル $q_j = -\lambda \partial_j T$ である。 δ_{ij} はクロネッカーのデルタ、 μ, λ は粘性係数及び熱伝導率を意味する。計算手法としては FDM を、圧力処理は圧力補正型 ICE 法を採用した。

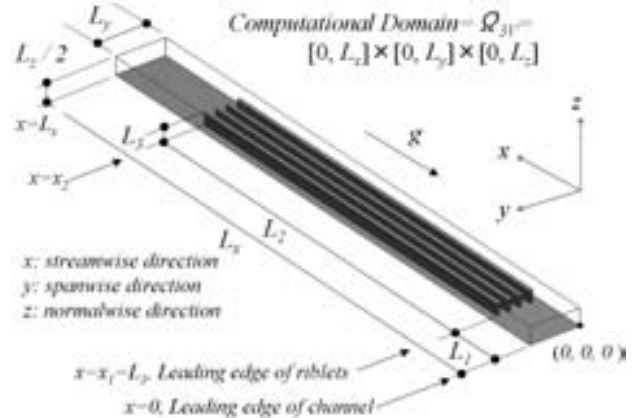


Fig. 1 Lower half of the computational domain with 4 riblets.

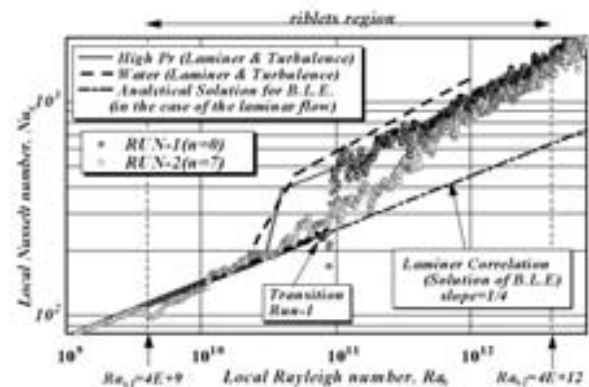


Fig. 2 Local Nusselt number vs local Rayleigh number.

3. 結果と考察

Fig.2 に計算結果の一例として、 $n = 0$ の場合 (RUN-1) と $n = 7, x_1^+ = x_1/L_x = 0.08, x_2^+ = x_2/L_x = 0.83, L_3/L_z = 0.4$ の場合 (RUN-2) の局所ヌセルト数, Nu_x と局所レイリー数, Ra_x の関係を示す。RUN-1 の場合、 $Ra_{xc} \sim 1 \times 10^{11}$ 近傍で乱流に遷移し熱伝達特性が向上している。一方でリブレットが 7 個設置された RUN-2 においては RUN-1 のような明確な乱流遷移は見出されずに $Ra_x > Ra_{xc}$ になっても熱伝達係数は RUN-1 より小さい。これはリブレットにより混合効果が抑制されることに起因していると考えられる。しかし局所レイリー数の増大に従い徐々に熱伝達特性が向上し、リブレットが無くなる $x^+ > x_2^+, (Ra_x > Ra_{x2})$ 以降で熱伝達係数が RUN-1 とほぼ等しくなる傾向が得られた。また RUN-2 の場合、 $Ra_{x1} = 4 \times 10^9 \leq Ra_x \leq Ra_{xc}$ 付近において、境界層方程式 (B.L.E.) から得られる層流理論解のまわりで揺らぎ始める。これはリブレット前縁が一種のトリッピングワイヤー効果をもたらしていることに起因している。渦構造と伝熱特性の関係は当日議論する。

参考文献

1. T. Okamura: Adv. Cryo. Eng. 55 (2010), to be published.

謝辞 本研究は日本学術振興会科学研究費補助金 (若手研究 B) の助成を得て行ったものである。

回転型低温6元対向スパッタによる接合電極用 Nb 及び Ta 薄膜作製と接合への適用

Format for presentation summary

諸橋 信一, 河野佑介, 波多野雅也 (山口大学大学院理工学研究科)

MOROHASHI Shinichi, KAWANO Yusuke, HATANNO Masaya (Yamaguchi University)

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

1. はじめに

超伝導トンネル接合 (STJ) 素子は, X 線検出器として半導体検出器を遙かに凌駕する性能を持っており, 高分子材料の非破壊検出・分析用検出器, あるいはテラヘルツ光の検出器として宇宙観測用途に期待されている。

準粒子寿命が Nb より長い bcc 構造の Ta 薄膜を作製するためには bcc 構造のバッファ層が必要で, Ta 薄膜を電極とする接合は必然的に 4 層程度の多層薄膜構造となる。高性能な X 線検出器用 STJ 素子として期待される, この接合作製には多元スパッタが必要である。そこで新たに開発した低温・6元・コンパクトを特徴とする多元スパッタ装置を用いて, Nb/AlO_x-Al/Ta/Nb 接合の作製を行った。

2. 回転型低温6元対向スパッタの特徴

図1に6元のターゲットを装着した回転型対向カソードのスパッタ概念図を示す。2つの対向する6角柱をおき, それぞれの6角柱内の磁石は閉じた磁気回路を形成し, 正対する6角柱面の磁石は反対磁極になっている。正対する6角柱を回転することで6元スパッタが可能となる。

その特徴は, 磁石の高機能的な配置による, (a)マルチターゲット化, (b)低温スパッタ化, (c)カソード容積のコンパクト化・省エネ化, の実現である¹⁻³⁾。製作した回転型低温6元対向スパッタ装置は, STJ 素子用の接合電極用 Nb, Ta, Al, W 薄膜の超伝導薄膜の4層及び, SiO₂と Al₂O₃の2種類の層間絶縁膜, 計6層の薄膜作製が可能な直径 100 mm Φ の6つのターゲットを備えている。

3. Nb/AlO_x-Al/Ta/Nb 接合作製

この装置を用いて, 基板温度 50°C 以下で T_c = 9.3 K, 残留抵抗比は 4.9, AFM 測定による表面荒さとして膜厚 100 nm で 2 nm 程度の値をもつ Nb 薄膜の作製⁴⁾, 接合サイズ 25 μm² の 4.2 K でギャップ電圧約 2.6 mV, 0.5 mV でのリーク電流密度 3.3 nA/μm² の Nb/AlO_x-Al/Nb 接合作製⁵⁾, の報告をしている。

図2に作製した Nb/AlO_x-Al/Ta/Nb 接合の 4.2 K での素子特性を示す。AlO_x 層は大気暴露 30 分で作製した。接合微細加工方法はフォトリソ, RIE および陽極酸化法を用いた⁶⁾。バッファ層 Nb は 10 nm, Ta 層は 100 nm で Ar1.3 Pa で作製した。Nb, Al の作製条件は Nb/AlO_x-Al/Nb 接合作製⁵⁾と同じで, Ta も含めて DC スパッタで堆積した。接合サイズ 25 μm² でギャップ電圧約 1.7 mV, 0.5 mV でのリーク電流密度 24 nA/μm² が得られた。

4. まとめ

低温・多元・省エネ・コンパクトを特徴とする回転型低温6元対向スパッタを用いて Nb/AlO_x-Al/Ta/Nb 接合を作製し, 4.2 K でリーク電流密度の小さな特性が得られた。bcc-Ta 薄膜作製に必要なバッファ層 Nb 薄膜の膜厚依存性等については当日発表する。

5. 謝辞

本研究の一部は, 平成17, 18年度経済産業省地域新生コンソーシアム研究開発事業「有機 EL 電極・保護膜形成用新型低温スパッタ装置の開発 (研究代表者: 山口大学諸橋信一) 17S6014」により実施したもので, 関係各位に感謝する。

参考文献

- 1) 特許第 3936970 号 薄膜作製用スパッタ装置, 発明者: 諸橋信一
- 2) 諸橋信一, 日本真空工業会真空ジャーナル No. 113 (2007), pp. 14-18
- 3) S. Morohashi, Transactions of Materials Research Society of Japan 33[4] 861-864 (2008)
- 4) 諸橋信一 他, 第 79 回 2008 年度秋季低温工学・超電導学会, 3D-a10
- 5) 諸橋信一 他, 2009 年度春季低温工学・超電導学会, 2C-a10
- 6) S. Morohashi, etc, IEEE TRANSACTIONS APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 15, pp. 98-101, (2005)

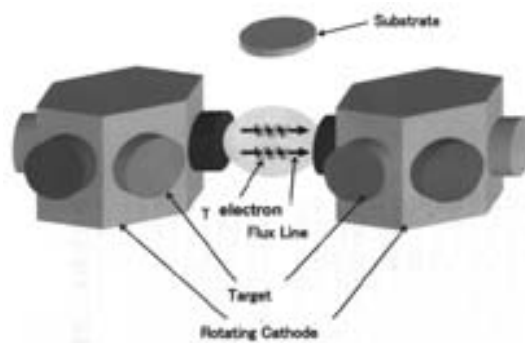


Fig. 1 Sputtering Image of a Rotating Multi-Facing Cathodes with 6 targets

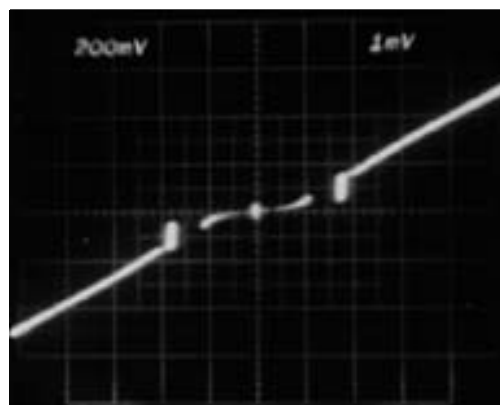


Fig. 2. I-V characteristics of Nb/AlO_x-Al/Ta/Nb junction measured at 4.2K. Vert.: 2mA/div, Horiz.: 1mV/div.