

光ファイバ温度センサの極低温特性(その3) — 低コスト亜鉛めっき光ファイバ —

Characteristics of optical fiber sensor at cryogenic temperature (Tertiary Report) — Low-cost zinc-plated optical fiber sensor —

山田 秀之, 水野 克俊, 小方 正文(鉄道総研)
YAMADA Hideyuki, MIZUNO Katsutoshi, OGATA Masafumi (RTRI)
E-mail: yamada.hideyuki.23@rtri.or.jp

1. はじめに

光ファイバ温度センサを用いて、超電導磁石内部の極低温環境での温度を測定する技術の開発を行っている。光ファイバ温度センサは1本のセンサで分布的に温度測定でき、熱侵入が少なく電気絶縁性が高いなど、極低温環境での温度測定に適している。これまでに、亜鉛めっきすることで極低温での感度が向上することなどを報告した¹⁻³⁾。今回は、光ファイバに直接めっきする低コストな方法について報告する。

2. 低コスト亜鉛めっき

亜鉛めっきする方法として、熔融めっきと電気めっきがあるが、熔融めっきの場合、亜鉛の融点が 419.5°Cであるため、450°C程度の液体亜鉛槽に光ファイバを浸けてめっきする必要があり、レーザーにより改質して作製した温度センサ部である FBG を消失させる可能性があるため、電気めっき法により亜鉛めっきする。しかし、電気めっきするためには、石英ガラスを主成分とする光ファイバに金属をコーティングする必要があり、その方法として、これまではスパッタリングを用いていた。スパッタリングはアルゴンなどを放電してプラズマ化して、これらをターゲットと呼ばれる材料の塊に衝突させ、そこから飛び出した材料の分子をめっきする対象物に積層させてコーティングするため専用設備が必要で、その分コストがかかる。

それに対し、今回報告するのは、スパッタリングを用いず無電解ニッケルを光ファイバに直接コーティングする方法である。電気めっきと異なり、めっき液に含まれる還元剤の酸化によって放出される電子により、ニッケルを含む液に浸漬することで対象物にニッケル皮膜を生成させる方法であり、通電を必要としないため、石英ガラスを主成分とする光ファイバのような絶縁体にもめっき可能となる。また、スパッタリングするための特殊な設備は不要になり、その分低コスト化することができる。

3. 試験方法・結果

今回初めて無電解ニッケルを用いた光ファイバの亜鉛めっきを行うため、まずは、FBG を持たないφ0.125mmの光ファイバに亜鉛めっきを行い、液体窒素に浸けることで室温～77Kのヒートショックを与え、剥離するかどうかを確認した。

なお、製作工程としては、光ファイバ表面をエッチングにより加工し、無電解ニッケルによりニッケル皮膜を析出した後、電気めっきにより亜鉛めっきした。

Fig.1 に、亜鉛めっきしている状況の写真を示す。

液体窒素に浸けた結果は、外観は特に問題なく、剥離することはない。

Fig.2 に、液体窒素に浸けた後の光ファイバの写真を示す。

4. 考察・まとめ

無電解ニッケルを用いた低コスト亜鉛めっきの試作として FBG を持たない光ファイバを用いて、その接着性を確認した。亜鉛めっきした光ファイバを液体窒素に浸けることによりヒートショック試験を実施したところ、剥離することなく、外観も問題なかった。当日は、接着性の確認として、界面を破断した結

果も併せて報告する。今後は、FBG のある光ファイバ温度センサに低コスト亜鉛めっきを行い、温度センサとしての特性を確認する。

本研究の一部は国土交通省の補助金を受けて実施した。

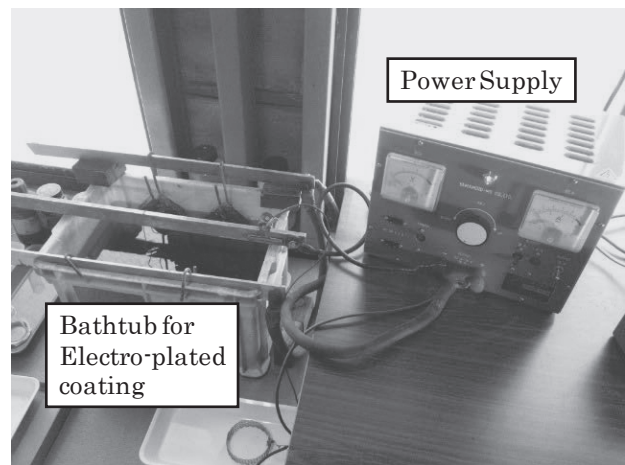


Fig.1 Electro-plated coating of zinc

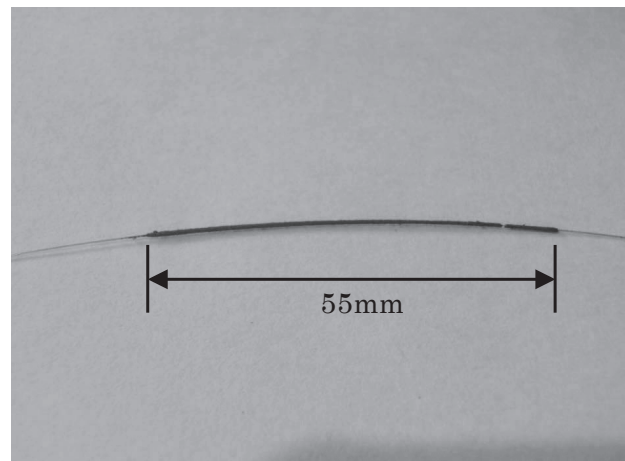


Fig.2 Low-cost zinc-plated optical fiber

参考文献

1. 山田秀之ら:「光ファイバ温度センサの極低温特性(その2) — 亜鉛めっき光ファイバによる極低温特性向上 —」2013年度春季低温工学・超電導学会, 1P-p03
2. 山田秀之ら:「光ファイバ温度センサの機械加振試験」2011年度秋季低温工学・超電導学会, 1P-p09
3. Yamada et al.:「Temperature Measurement at Cryogenic Temperature using Optical Fiber Sensor」2012ICEC24, 15P-P01-05

異種金属間摩擦攪拌接合の界面評価 —非破壊検査と破壊検査による検討—

Evaluation of interface of friction stir welding between dissimilar metals using NDE methods and tensile test

廿日出 好 (近畿大学); 吉田 圭佑, 鹿毛 孝浩, 鈴木 健文, 安井 利明, 福本 昌宏, 田中 三郎 (豊橋技科大)
 HATSUKADE Y. (Kinki Univ.); YOSHIDA K., KAGE T., SUZUKI T., YASUI T., FUKUMOTO M., TANAKA S. (TUT)
 E-mail: hatsukade@hiro.kindai.ac.jp

1. 緒言

摩擦攪拌接合 (Friction Stir Welding: FSW) は、融点の異なるアルミと鉄鋼などを高い強度を持たせて接合できる新しい溶接技術の一種である[1]。本技術はすでに実用的に使用されているが、FSW の強度を決定する接合界面に発生する金属化合物は数～数 $10 \mu\text{m}$ 程度の厚さであり、このような界面および接合強度を非破壊的に評価する検査技術はまだ確立されていない。一方、我々は HTS-SQUID グラジオメータを用いて、導電性を有する材料・構造物に流した電流の分布を可視化できる非破壊検査技術を開発してきた[2]。この方法により、FSW 界面を通過するように電流を流せば界面を含んだ接合体の導電性分布が得られるため、界面情報を非破壊的に評価・解析できる可能性がある。今回、我々は、HTS-SQUID グラジオメータを用いた電流分布可視化技術を、アルミ・ステンレス突き合わせ FSW サンプルに適用し、FSW 界面の導電性を評価するとともに、超音波探傷による欠陥検査、引張試験による強度測定の結果と比較を行い、界面評価・解析の可能性について検討した。

2. FSW サンプルへの非破壊検査および破壊検査の適用

今回、サンプルとして、アルミ合金 A6063-T6 とステンレス鋼 SUS304 の板材を突き合わせ、異種金属間 FSW サンプルを作製した。この際、ツール回転速度と移動速度を $1000 \sim 4000\text{rpm}$, $200 \sim 800\text{mm/min}$ の範囲で変化させ、作製条件の異なるサンプルを作製した。サンプルのサイズはいずれも $580\text{mm}^L \times 50\text{mm}^W \times 6\text{mm}^T$ である。

これら FSW サンプルの界面を通過して電流を流れるよう、サンプルの両側面に電極を貼り付け、電源と接続した。20mA, 400Hz の交流電流をサンプルに印加した際に発生する磁場の勾配分布を計測するため、HTS-SQUID グラジオメータを用いた非破壊検査装置による電流可視化手法を適用した[2]。本装置で用いた SQUID は、 $3\text{mm} \times 3\text{mm}$ サイズの矩形コイル 2 個を差動で結合した平面一次微小型 HTS-SQUID グラジオメータで、素子のホワイトノイズレベルは約 $10 \mu\phi_0/\text{Hz}^{1/2}$ である。本素子により、サンプル上部に発生した磁場 B_z の 2 方向の勾配 dB_z/dy と dB_z/dx の分布をそれぞれ計測し、電流密度 J_x と J_y に変換することで、サンプルを流れる電流分布を可視化した。計測でのリフトオフ (SQUID サンプル間距離) は 5mm とした。この際、サンプルの SUS 側に残留磁化が約 $140 \mu\text{T}$ 発生しており、そのままでは SQUID をサンプルに接近させることが困難であった。そこで、これまでに我々が開発してきた SQUID 出力電圧をフィードバック磁束に変換して残留磁化をキャンセルする方法を適用した。これによりリフトオフ 5mm での磁場勾配計測が可能となった。

次に、別の非破壊検査技術である超音波検査を同サンプルに適用し、サンプルの内部の音響インピーダンスの分布を計測した。また、これらの非破壊検査試験終了後、サンプルの特定区間を切り出して引張試験を行い、区間ごとの界面強度 (引張応力) を調べた。

3. 実験結果

ツール回転速度 1000rpm , ツール移動速度 300mm/min 一定の条件で接合したサンプル 1 に対して、上記の電流注入法を用い、SQUID グラジオメータで計測した磁場勾配分布 dB_z/dy および dB_z/dx の分布を Fig.1 の中段と下段に示す。これらの分布から変換・合成した電流分布を同図上段に示した。

この FSW サンプルでは、サンプル下側の側面から印加された電流は、中央に集まってから、主にサンプル中央の界面を通過して流れることが示された。このサンプルは一定のツール移動速度で接合されたが、余熱区間および接合終端付近での高熱の影響により、サンプル中央の界面の導電性が高い (内部欠陥による導電性変化を含む) 可能性が示唆された。

次に、Fig.1 上段の図に示す $x=110\text{mm}$, および $x=290\text{mm}$ における、電流が界面に沿って流れる導電性が低いと推測される部分と、界面を通過して電流が流れる導電性が高い部分について、超音波探傷により得られた断面の音響インピーダンス分布の計測結果を Fig.2(a), (b) にそれぞれ示す。界面付近に着目すると、導電性の高いサンプル中央部の方が、欠陥 (ポイド等) の影響と考えられるエコーの範囲・強度ともに小さいことが示された。次に、上記 $x=110\text{mm}$ の区間を含む、サンプル左側 (区間1), $x=290\text{mm}$ を含むサンプル中央 (区間2), そしてサンプル右側 (区間3) から引張試験用にサンプルを複数個切り出し、ポイド等欠陥の影響を除去した状態に加工し、それぞれの区間における平均引張応力を計測した。その結果、導電性の高い中央の区間2の応力が有意な大きさの違いを示し、FSW 界面の導電性と強度に相関がある可能性が示された。

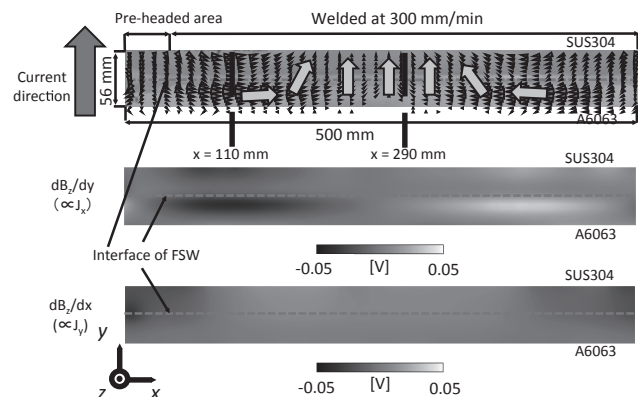


Fig.1 Current map estimated from measured field gradients (upper). Middle and lower are field gradient distributions of $dB_z/dy (\propto J_y)$ and $dB_z/dx (\propto J_x)$.

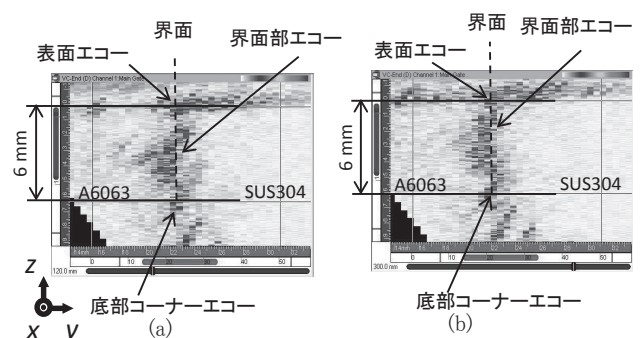


Fig.2 (a) Acoustic impedance distribution at $x=110\text{mm}$.

(b) Acoustic impedance distribution at $x=290\text{mm}$.

参考文献

- [1] T. Yasui, et al., Materials Science Forum **449-452** (2004) 433.
- [2] Y. Hatsukade, et al., Physica C **484** (2013) 195.

BaHfO₃ 人工ピン導入 REBCO 線材の低電界領域の臨界電流特性評価と 磁束クリープの影響に関する考察

Influence of flux creep on critical current density at very low electric field in a BaHfO₃ doped REBCO coated conductor

小野寺 優太, 雁木 卓, 今村 和孝, 東川 甲平, 井上 昌睦, 木須 隆暢(九大); 吉積 正晃, 和泉 輝郎 (ISTEC)
ONODERA Yuta, GANGI Suguru, IMAMURA Kazutaka, HIGASHIKAWA Kohei, INOUE Masayoshi, KISS Takanobu (Kyushu Univ.);
YOSHIZUMI Masateru, IZUMI Teruo (ISTEC)
E-mail: y.onodera@super.ees.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

近年、高温超伝導線材 (REBCO 線材) を用いたコイル機器の開発研究が進められている。MRI などのコイル応用機器では均一な静磁界が求められるが、アスペクト比の高い REBCO 線材においては発生させた磁界によって生じる線材自体の磁化と磁化電流が磁場の空間的均一性に影響を及ぼす。更に磁化電流は熱擾乱により減衰するため、磁場の時間的均一性にも影響を及ぼすこととなる。従って、磁束クリープに代表される、熱励起の影響下における臨界電流特性を明らかにすることが求められる。しかしながら、これらに対応する電界基準は 10^{-10} V/m 程度と、一般的な四端子法で計測される電界領域 (10^{-4} V/m 程度) よりも数桁以上低いことから、通電法での測定は困難である。

本研究では REBCO 線材の磁化緩和測定を行い、超低電界領域における磁場中 J_c 特性を明らかにすると共に、四端子法による測定結果と比較し、広い電界領域に亘る E - J 特性について理論的な考察を行った。

2. 実験

実験には、BaHfO₃ を人工ピンとして添加した GdBa₂Cu₃O_{7-δ} 線材を用いた。同線材を四端子法による測定では長さ 500 μm、幅 60 μm のマイクロブリッジ形状に、磁化緩和測定では長さ 3 mm 幅 1 mm、の矩形に加工し測定用試料とした。磁化緩和特性は SQUID を用いた磁化率計 (MPMS) により測定した。

3. 実験結果及び考察

Fig. 1 に四端子法と磁化緩和測定により得られた 65 K での E - J 特性を示す。各印加磁場において 10^{-2} ~ 10^{-10} V/m 程度の幅広い電界領域に亘る電流輸送特性が実験的に得られている。これらの実験結果に対して、我々の提出している E - J 特性の解析式を用いた考察を行った。解析式は、パーコレーション転移モデルに磁束のホッピングによるクリープの影響を考慮したものである [1]。解析により得られた E - J 特性 (Fig. 1 実線) は、それぞれの実験結果と良く一致しており、同モデルの有効性が確認された。

磁束フローのみから推定される曲線 (Fig. 1 破線) との差異が、磁束ホッピングの寄与を意味している。磁束フローモデル (FF) では、素過程における熱擾乱の影響は、ピンポテンシャルが浅くなる効果として取り入れられており、磁束フローに対する駆動力の閾値が存在する。一方、磁束クリープモデル (FC) では閾値以下の電流値において磁束ホッピングが生じる。Fig. 2 に超低電界領域における J_c の磁場依存性を求めた結果を示す。磁束クリープを考慮した解析により得られた J_c - B 特性 (実線) と、磁束フローのみから推定される曲線 (破線) との比較から、 10^{-10} V/m の超低電界領域では、磁化緩和の主因として磁束ホッピングの影響が顕著となっていることが明らかとなった。磁化の緩和特性等の実験結果及び解析の詳細については当日報告する。

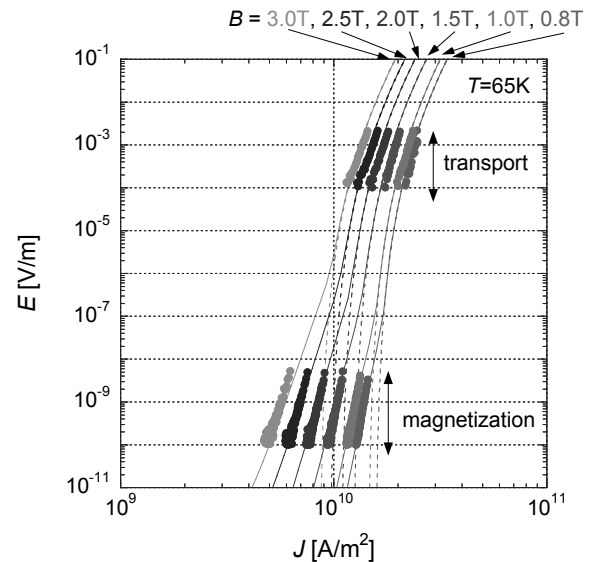


Fig. 1 E - J characteristics measured by dc four-probe and magnetic relaxation method.

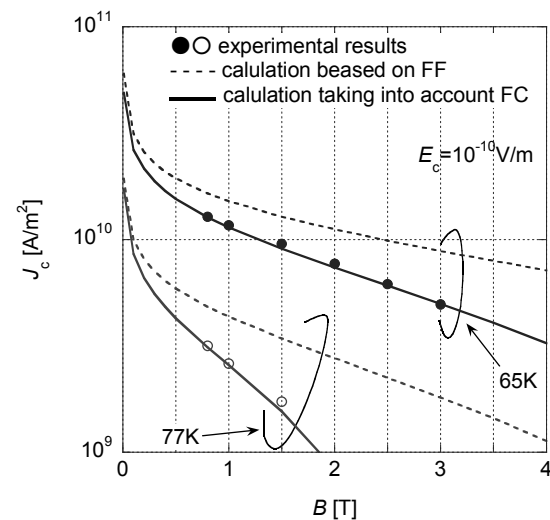


Fig. 2 Comparison two models with and without taking into account flux hopping due to flux creep.

謝辞

本研究の一部は、高温超伝導コイル基盤技術開発プロジェクトの一環として、経済産業省の委託により実施するとともに、日本学術振興会の科研費 (24760235) の助成を得て行ったものである。

参考文献

1. T. Kiss, et al., *Physica C* **392-396** (2003) 1053-1062

BaHfO₃ 人工ピンを導入した EuBa₂Cu₃O_{7-δ} 線材の磁場中臨界電流特性

In-field critical current density of BaHfO₃ doped EuBa₂Cu₃O_{7-δ} coated conductor

田中 健太, 横溝 孝明, 今村 和孝, 東川甲平, 井上 昌睦, 木須 隆暢(九大); 吉田 朋, 吉積 正晃, 和泉 輝郎 (ISTEC)
 TANAKA Kenta, YOKOMIZO Takaaki, IMAMURA Kazutaka, HIGASHIKAWA Kohei,
 INOUE Masayoshi, KISS Takanobu (Kyushu Univ.);
 YOSHIDA Tomo, YOSHIZUMI Masateru, IZUMI Teruo (ISTEC)
 E-mail: k.tanaka@super.ees.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

様々な機器への応用が期待されている RE₁Ba₂Cu₃O_{7-δ} (REBCO, RE = Rare Earth) 線材は、超伝導機器の実用化に向け磁場中臨界電流(J_c)の向上が求められている。パルスレーザー蒸着(PLD)法による線材では、人工ピンニングセンターとして BaMO₃ (BMO, M=metal)の導入が検討されている。なかでも、BaHfO₃ (BHO)は、超伝導層を厚膜化した際にも磁場中の臨界電流密度(J_c)が低下しないことから、 J_c 向上に有効な材料として注目されている。我々はこれまで、GdBCO 線材への BHO 人工ピンの導入効果について報告してきた[1]。近年、RE 種に Eu を用いた線材で磁場中 J_c 特性の更なる向上が得られるとの報告がなされており、新たな RE 種として有望視されている。しかしながら、BHO 人工ピンを導入した EuBCO 線材の磁場中 J_c 特性の詳細は今のところ調べられていない。本研究では、BHO 人工ピンを導入した EuBCO 線材の磁場中臨界電流特性を詳細に調べ、人工ピンの導入効果について検証を行った。

2. 実験方法

IBAD 基板上に PLD 法で EuBCO 超伝導層を形成した。その際に、3.5mol% の BHO を添加したターゲットを用いることで人工ピンの導入を図っている。超伝導層の膜厚は 1.85 μm であった。同線材を約 1cm 長に切り出し、ウェットエッチングによりマイクロブリッジ形状に加工した後、直流四端子法により電流-電圧特性の温度、磁場、磁場印加角度依存性を計測した。

3. 実験結果及び考察

Fig.1 に、77K における J_c - B - T 特性の実験結果(プロット)を示す。同図には、我々が以前報告した、BHO 導入 GdBCO 線材と人工ピン未導入 GdBCO 線材の特性も載せている[1]。これらの比較より、BHO 導入 EuBCO 線材が幅広い磁場領域において優れた J_c 特性を有していることが分かる。3T では、0.42MA/cm² の J_c 値が得られている。これは、80A/cm-w の J_c 値に相当しており、同線材が高い実用性能を有していることが確認できる。

次に、実験結果を元に電流輸送特性のモデリングを行った。

本モデリング手法を用いることで、任意の温度、磁場における臨界電流特性の定量的把握が可能となる(Fig.1 の実線)。Fig.2 に、温度-磁場平面上における等 J_c マップを示す。等 J_c マップ上で BHO 人工ピンの導入効果について比較すると、BHO 導入 EuBCO 線材では、カラースペクトルで表す等 J_c ラインが、より高温、強磁場側へとシフトしていることが分かる。このようなマッピングによる J_c の定量的な可視化は、人工ピンの導入効果の検証だけでなく、動作磁場や運転電流などを総合的に考慮した機器の設計の際に有用である。

当日は、他の温度を含めた臨界電流特性の詳細を示すとともに、巨視的ピン力密度や転移磁場等のピンニング特性に対する人工ピン導入効果についても報告する。

謝辞

本研究の一部は、高温超伝導コイル基盤技術開発プロジェクトの一環として、経済産業省の委託により実施するとともに、日本学術振興会の科研費(24760235)の助成を得て行ったものである。

参考文献

1. M. Inoue, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 87 (2013) 3B-a07

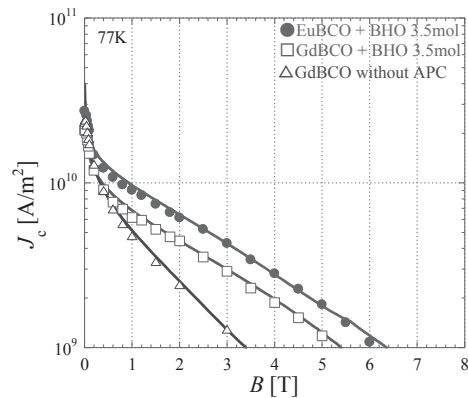
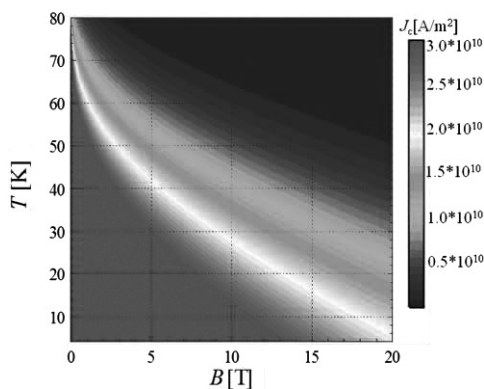
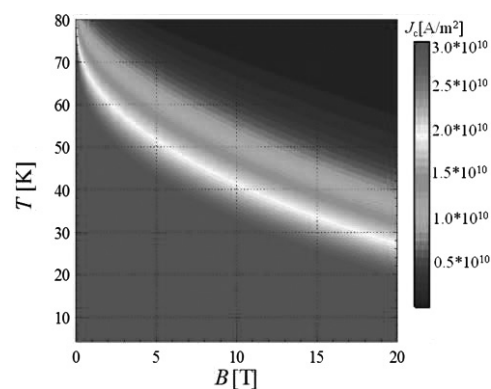


Fig.1 Comparison of J_c - B - T characteristics in $B//c$. Lines are analytical expression whereas markers are experiments.



(a) GdBCO coated conductor without APC.



(b) EuBCO+BHO coated conductor

Fig.2 Contour map of J_c in B - T plane

連続的に曲げ径を変化させた RE-123 線材の曲げ歪特性試験

Bending Test of RE-123 Coated Conductor Wound with Continuous Variation of Bending Diameter

西浦 陽平, 上津原 大, 東川 甲平, 井上 昌睦, 木須 隆暢 (九州大学); 吉積 正晃, 和泉 輝郎 (ISTEC)
NISHIURA Yohei, UETSUHARA Dai, HIGASHIAKAWA Kohei, INOUE Masayoshi, KISS Takanobu (Kyushu Univ.);
YOSHIZUMI Masateru, IZUMI Teruo (ISTEC)
E-mail: y.nishiura@super.ees.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

希土類系 (RE-123) 高温超伝導線材は、その良好な高磁界特性を生かしたコイル応用が期待されている。一方、加速器応用の場合が特に顕著となるが、線材は 3 次元的な曲げを含めて様々な曲げを経験することになり、それらに対して健全な超伝導特性を確保できることを予め担保しておく必要がある。ただし、一般的な曲げ試験では、各曲げ条件に対応した治具を用意し、その際の臨界電流値の変化を四端子法によって取得する手法がとられるが、この場合、最も単純なフラットワイズ曲げだけでも、様々な曲げ径の治具が必要となり、その曲げも離散的となる^[1]。そこで、上記に柔軟に対応できるような新たな曲げ試験手法の考案が期待される。そこで本研究では、まずフラットワイズ曲げを対象として、線材をコイル形状に巻くことで、長手方向位置によって様々な曲げ径を連続的に経験させ、その線材に対してリール式走査型ホール素子顕微鏡 (RTR-SHPM)^[2]を用いた臨界電流の長手方向分布評価を行うことにより、どのような曲げ条件の位置で線材特性が低下するかを明らかとする曲げ歪特性試験手法を提案する。

2. 実験

測定対象とした RE-123 線材の構造を Fig. 1 に示す。本線材は、PLD 法によって作製された 5 mm 幅の線材であり、超伝導層側に 75 ミクロン厚の銅の安定化層が適用されている。まず、本線材に対して RTR-SHPM を用いることにより、その線材の臨界電流の長手方向分布の測定を行った。次に、その線材に対して、Fig. 2 に示すように内径 8 mm と 10 mm の各治具に銅安定化層が外側と内側に来るように線材をコイル形状に巻きつけ、線材に様々な曲げ径を連続的に経験させた。その後、線材を巻き戻し、前述と同様に RTR-SHPM によってその線材の臨界電流の長手方向の分布を評価した。

3. 結果・考察

Fig. 3 にその結果を示す。曲げる前の線材の特性は長手方向にわたってかなり均一であった事がわかる。一方、銅安定化層を外側にして巻いた場合、コイルの直径が 16 mm 以下となる位置から特性の低下が始まっていることが観測された。幾何学的には超伝導層は線材厚さ方向の中央部に位置するが、基板の Hastelloy と安定化層の銅の Young 率の違いから超伝導層には引張力が働くことが要因と考えられる。一方、銅安定化層を内側にして巻いた場合、つまり超伝導層に圧縮力が働く場合、コイルの直径が 10 mm 付近となるまで特性の低下は観測されなかった。このように連続的に曲げ径を変化させた RE-123 線材に対して RTR-SHPM を用いて臨界電流の長手方向分布を評価することにより、1 回の測定で特性の低下が始まる曲げ径を解明することに成功した。

謝辞

本研究は、経産省高温超電導コイル基盤技術開発プロジェクト「共通基盤技術の研究開発」による助成を受けて実施するとともに、日本学術振興会の科研費 (24360122) の助成を得て行ったものである。

参考文献

- [1] M. Sugano et al.: Supercond. Sci. Technol. 24 (2011) 075019.
[2] K. Higashikawa et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. 24 (2014) 6600704.

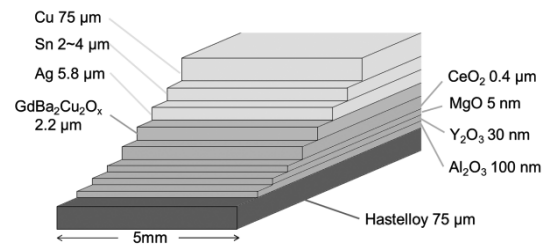


Fig. 1 Schematic diagram of the sample.

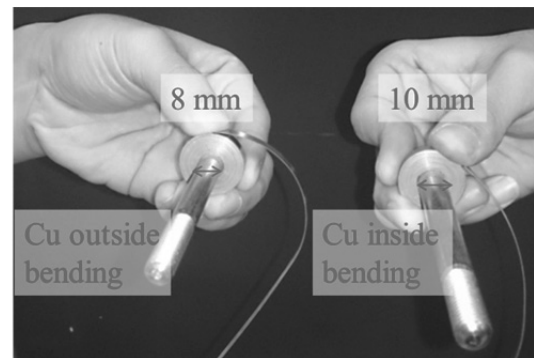


Fig. 2 Winding of coated conductor for a bending test with continuous bending radii.

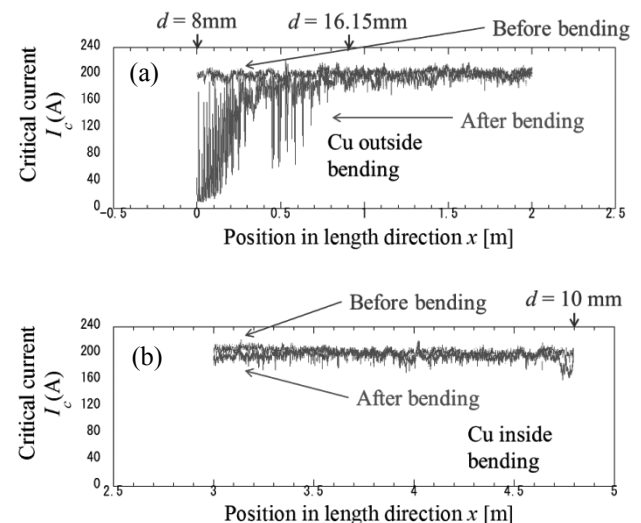


Fig. 3 Longitudinal distributions of local critical currents before and after winding: (a) tensile and (b) compressive strains for the superconducting layer.

挿入された高温超電導線材の位置及び種類による交流損失特性への影響

Influence of the positions and HTS tape shapes inserted in and iron core on AC loss characteristics

桜井 達哉, 伏見 侑, 小川 純, 福井 聡, 岡 徹雄, 佐藤 孝雄 (新潟大学)

SAKURAI Tatsuya, FUSHIMI Atsumu, OGAWA Jun, FUKUI Satoshi, OKA Tetsuo, SATO Takao (Niigata University)

E-mail: ogawa@eng.niigata-u.ac.jp

1. はじめに

交流超伝導電力機器において高温超伝導線材の使用量を減らす目的で、鉄心を使用した設計が提案されている。超伝導線材の周囲に磁性体がある場合、超伝導線材の交流損失特性に大きく影響を与えることが報告されている。[1]以前報告した変圧器用の鉄心に矩形の溝を形成し、この溝の中心に超伝導線材を挿入したときの交流損失は著しく増加することが実験的に示された。本研究では、同様のシステムで溝中の位置を変化させた場合と線材の種類を変えた時の損失特性について実験により評価を行った。

2. 実験方法

実験装置として図1に示すような市販されている変圧器用カットコアを使用し、片側に 18 ターンの励磁用コイル、逆側に縦 10mm 横 5mm の溝を加工した。加工した溝の中に超伝導線材を漏れ磁束に対して線材面が平行となるように溝の中央に配置し、線材の位置を中心から位置 l を $l = 0.0, 0.5, 1.0$ mm 移動させた時の交流損失の測定を行った。交流損失の測定方法としては、鉄心中では磁性体の影響を受け電気的な測定を行うことができないため、線材を断熱材で覆うことで交流損失による温度上昇により損失測定を行う熱的測定法により

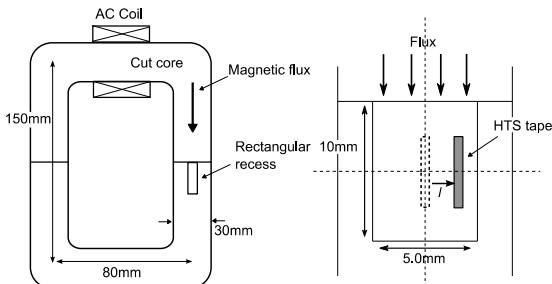


Fig.1 Schematic illustration of the experimental setup

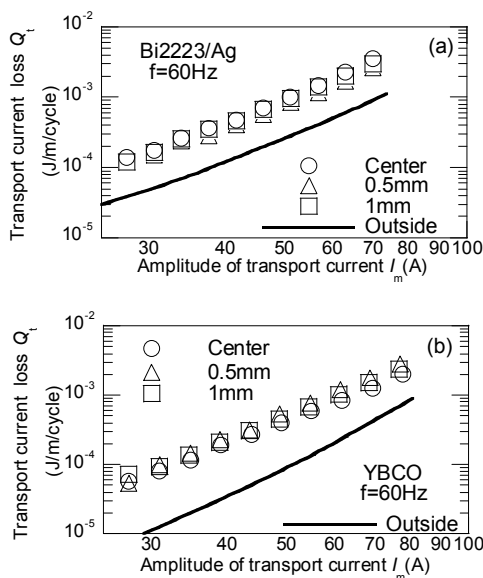


Fig.2 AC transport current loss

測定を行った。使用した高温超伝導線材は臨界電流値が 68.9A の Bi2223/Ag 線材と 77.0A の YBCO 線材の 2 種類を用い、それぞれの通電損失と磁化損失の測定を行った。

3. 実験結果

図2(a)は Bi2223/Ag 線材、(b)は YBCO 線材の溝中の位置を移動させた条件での通電損失を示す。実線は鉄心外における交流通電損失を示す。図よりどちらの線材の損失も鉄心外での通電損失より増加している。YBCO の通電損失は一般的に鉄心外において損失の傾きは通電電流に対し 4 乗となるが、鉄心内では傾きが 3 乗となっている。また、どちらの線材も中心から位置をずらしても通電損失に大きな変化は見られないことがわかる。よって鉄心内に配置することにより線材自身に発生する自己磁界の侵入過程が変化して損失は増大するが、線材の位置を移動しても損失に大きな変化は見られないと言える。

図3に漏れ磁界による磁化損失を示す。図中の横軸は励磁用コイルに通電している電流の波高値 I_m を示している。漏れ磁界の大きさは I_m が 10A のとき 9.5mT であった。図より鉄心内の損失は鉄心外に比べ非常に大きい値を示している。また一般的に薄膜形状であるため YBCO 線材の平行磁界下での磁化損失は非常に小さいのに対し、鉄心内では Bi2223/Ag と同等の損失が生じている。YBCO 線材では中心から位置をずらすことで若干損失が増加することが確認された。この要因として鉄心内の漏れ磁界が線材面に完全に平行でないことが考えられ、垂直成分の磁界が増加したためであると考えられる。

参考文献

1. T. Maekawa, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 86 (2012) p.77

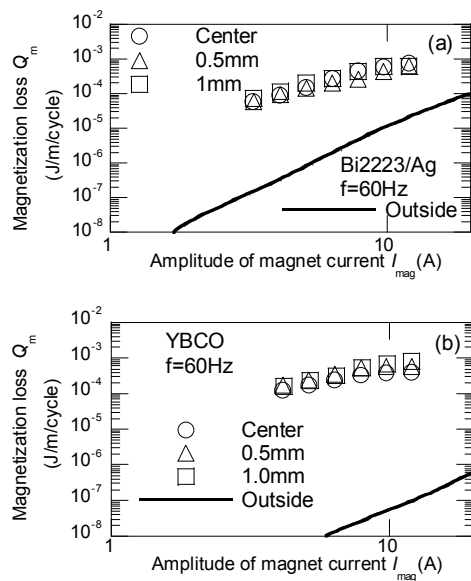


Fig.3 Magnetization loss

構造相変態 PIT 法による鉄カルコゲナイド系超伝導線材の高臨界電流密度化

Achieve of high critical current density in iron chalcogenide superconducting wires by a chemical-transformation PIT process

井澤 宏輝, 水口 佳一, 三浦 大介 (首都大学東京)
 IZAWA Hiroki, MIZUGUCHI Yoshikazu, MIURA Osuke (TMU)
 E-mail: izawa-hiroki@ed.tmu.ac.jp

1. はじめに

KFe_2Se_2 は $T_c > 30[\text{K}]$ および $H_{c2} > 50[\text{T}]$ の優れた超伝導特性を示すことから^{[1][2]}、非常に高いポテンシャルを有していることが知られている。しかしながら、K を含む物質であることから大気中での扱いが困難であり、線材としての成功例は未だに報告が無い。そこで筆者らは、構造相変態 PIT 法を用いた KFe_2Se_2 超伝導線材の作製を行い、各種測定および特性の評価を行った。本公演では、各種作製条件による、 KFe_2Se_2 超伝導線材の特性について最新の結果を報告する。

2. 実験方法

構造相変態 PIT 法により $\text{KFe}_2(\text{Se}_{1-x}\text{S}_x)_2$ 超伝導線材を作製した。線材コアの前駆体となる $\text{KFe}(\text{Se}_{1-x}\text{S}_x)_2$ を固相反応法、真空中、 600°C にて作製。得られた $\text{KFe}(\text{Se}_{1-x}\text{S}_x)_2$ を Fe チューブに封入し、Fe キャップをして冷間圧延・平圧延を行う。圧延後、得られた線材切り分け再びガラス管に真空封入し、 $400\sim 800^\circ\text{C} \cdot 3\sim 30\text{h}$ でアニールを行う。線引き以外の作業工程は原則的に glove box 内・アルゴン雰囲気中にて行う。アニールにより Fe シースから線材コアへ Fe を供給し、 $\text{KFe}_2(\text{Se}_{1-x}\text{S}_x)_2$ をコアとするテープ線材の作製を行った。

測定は、SQUID による磁化測定、4 端子法による ρ -T 測定、線材コアの X 線回折、光学顕微鏡によるテープ線材断面の観察を行った。

3. 実験結果と考察

SQUID による線材コアの磁化測定結果を、図 2 に示す。前駆体を $\text{KFe}(\text{Se}_{0.875}\text{S}_{0.125})_2$ とし、 $625^\circ\text{C} \cdot 5$ 時間アニールした後に急冷を行った線材コアにおいて、 $27.5[\text{K}]$ の超伝導転移を観測した。現在、S 置換量の増加とともに T_c が徐々に減少することを確認しており、Se の 12.5% を S に置換することにより $T_c = 27.5[\text{K}]$ 、25% においては $T_c = 20[\text{K}]$ となることを磁化測定にて観測している。しかしながら、S 置換を行うことにより、硬質なコアを得ることができることから、線材コアとしては S 置換を行うことが望ましいと考えられる。

光学顕微鏡による線材コアの観察では、目立った void は観察されず、密に詰まった線材コア確認した。

また、4 端子法による ρ -T 測定では、前駆体 $\text{KFe}(\text{Se}_{0.95}\text{S}_{0.05})_2$ とし、 $625^\circ\text{C} \cdot 5$ 時間アニールした後に急冷を行った線材コアにおいて、 $34[\text{K}]$ の $T_{c,onset}$ を観測した。しかし、明確な $T_{c,zero}$ は観測できておらず、作製条件の最適化が必要とされる。

当日は、各種前駆体およびアニール条件における線材特性および作製法の詳細を報告する予定である。

参考文献

1. J. Guo et al., Phys. Rev. B Vol.82, (2010) pp. 180520
2. K. Wang et al., Phys. Rev. B Vol. 84 (2011) pp. 054526

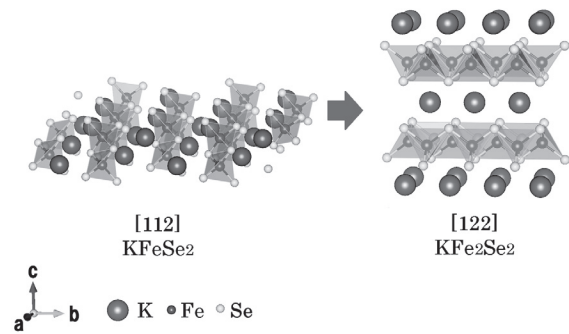


Fig.1 Crystal structure of KFeSe_2 and KFe_2Se_2 .

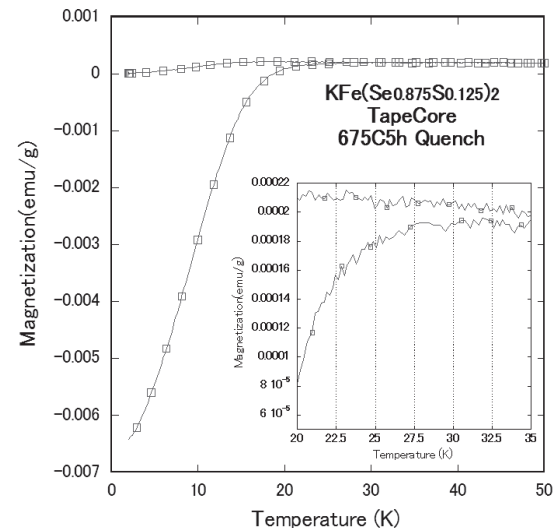


Fig.2 Temperature dependence of magnetization of the obtained tape core for $\text{KFe}(\text{Se}_{0.875}\text{S}_{0.125})_2$, $T_a = 675^\circ\text{C} \cdot 5\text{h}$.

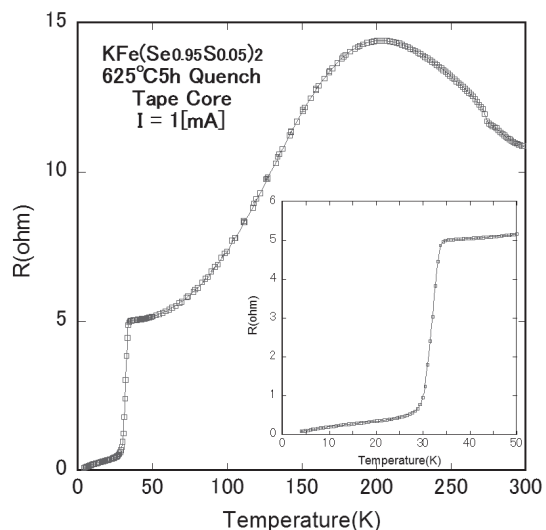


Fig.3 Temperature dependence of resistivity from 300 to 4 K for $\text{KFe}(\text{Se}_{0.95}\text{S}_{0.05})_2$, $T_a = 625^\circ\text{C} \cdot 5\text{h}$.

磁気顕微法による Ba(Fe,Co)₂As₂ 薄膜の局所臨界電流密度分布の評価

Characterization of Local Critical Current Density Distribution in Ba(Fe,Co)₂As₂ Film Based on the Magnetic Microscopy

細谷 築, 東川 甲平, 井上 昌睦, 木須 隆暢 (九州大学);

IIDA Kazumasa, GRINENKO Vadim (IFW Dresden); HOLZAPFEL Bernhard (Karlsruhe Institute of Technology)

HOSOYA Kizuku, HIGASGIKAWA Kohei, INOUE Masayoshi, KISS Takanobu (Kyusyu Univ.);

IIDA Kazumasa, GRINENKO Vadim (IFW Dresden); HOLZAPFEL Bernhard (Karlsruhe Institute of Technology)

E-mail: k.hosoya@super.ees.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

鉄系超伝導体は、臨界温度が比較的高く、磁界特性にも優れることから、精力的に材料開発が進められている。また、その材料の特性を把握する上では薄膜という形態が適している。一方、このような薄膜の特性は、一般的に四端子法や磁化法によって評価されるが、空間均一性が担保されていない状況では正確に把握することができない。そこで本研究では、CaF₂単結晶基板上に成膜されたBa(Fe,Co)₂As₂薄膜を対象として、磁気顕微法により局所臨界電流密度分布の評価を行った。

2. 実験方法

測定対象とした試料は、Fig. 1 に写真を示すような、CaF₂単結晶基板上にPLD法で作製された厚さ113 nm、臨界温度が25 KのBa(Fe,Co)₂As₂薄膜である。なお、X線回折の評価結果では高度に配向した薄膜であることがわかっている。本試料を5 Kまで冷却し、SHPM (Scanning Hall-probe Microscopy) によって残留磁界分布を計測した。

3. 結果・考察

測定によって得られた残留磁界分布をFig. 2に示す。また、Biot-Savart則の逆変換によって得られた電流密度分布をFig. 3に示す。臨界状態モデルによれば、これは J_c 分布に対応することがわかっており、対応する電界基準は 10^{-11} V/m程度であることが磁界緩和測定からわかっている。試料が均一な場合には、Fig. 2の残留磁界分布は一つのルーフトップパターンとして観測されるはずである。ここで、Fig. 2ならびにFig. 3の左部分に着目すると、磁界分布は均一なパターンを示し、9 MA/cm²もの J_c 値を示す領域が存在することがわかった。これは、同様の材料で報告されている値^{[1][2]}の数倍であり、部分的に極めて特性の高い薄膜の作製に成功していることを意味している。一方で、Fig. 2ならびにFig. 3の右部分には障壁がみられ、また J_c 値も左部分より低い値を示している。本評価手法によって位置特定した特性低下部に対して組織観察を行うことにより、特性制限因子の解明が期待できる。

4. まとめ

単結晶基板上に作られたBa(Fe,Co)₂As₂薄膜を対象として、四端子法や磁化法では観測が困難な局所的に高い J_c 値や局所欠陥部位を把握することが出来た。これらの結果から、局所高特性部位や欠陥部位に位置を絞りSEM/TEM観察を行うことにより電流制限因子の解明にも繋がり、本測定手法は、空間均一性の把握が、材料のポテンシャルの解明や作製プロセスの最適化に有効であると考えられる。

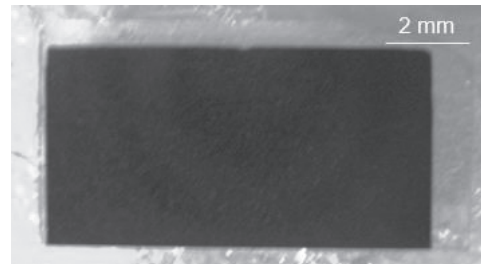


Fig. 1. Photograph of the Ba(Fe,Co)₂As₂ film.

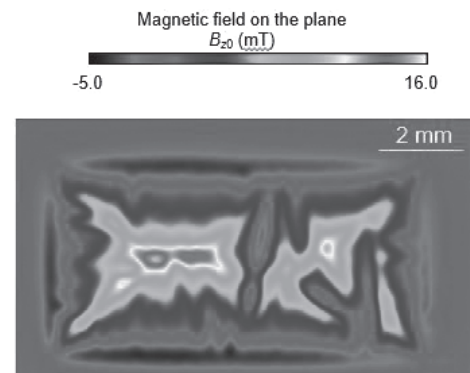


Fig. 2. Remanent magnetic field distribution in the Ba(Fe,Co)₂As₂ film measured by the scanning Hall-probe microscopy at 5 K.

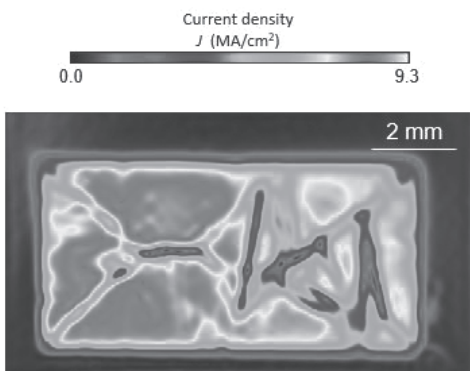


Fig. 3. Current density distribution estimated from the magnetic field distribution shown in Fig. 2.

謝辞 本研究は、JST 国際科学技術共同研究推進事業戦略的国際共同研究推進プログラム(研究領域:超伝導)「SUPER-IRON」の一環として行ったものである。

参考文献

- [1] T. Katase et al., Applied Physics Express 3 (2010) 063101.
[2] D. Rall et al., Phys. Rev. B 83 (2011) 134514.

kW 級磁気冷凍機の性能向上

Improvement of a kW-class magnetic refrigerator

宮崎 佳樹, 池田 和也, 長谷川 均(鉄道総研); 平野 直樹(中部電力);
 妻 相哲(サンデン); 岡村 哲至, 野口 芳直(東工大)

MIYAZAKI Yoshiki, IKEDA Kazuya, HASEGAWA Hitoshi (RTRI); HIRANO Naoki (Chubu Electric Power Co);
 BAE Sangchul (Sanden Corporation); OKAMURA Tetsuji, NOGUCHI Yoshinao (Tokyo Tech)
 E-mail: miyazaki.yoshiki.23@rtri.or.jp

1. はじめに

本研究は、鉄道車両用空調の省エネルギーを目的とし、磁気熱量効果を用いた kW 級磁気冷凍機の開発に取り組んでいる。第 88 回低温工学・超電導学会において、磁気作業物質にガドリニウム(Gd)系材料を用い、1.4 kW の冷凍能力が得られたことを報告した[1]。一方で、温度スパン (ΔT)は 12 K 程度にとどまっていたため、温度スパンの拡大を目指し、充填材料やダクト構成を見直した。

2. kW 級磁気冷凍機

試験に用いた磁気冷凍機の概略を Fig. 1 に示す。磁気作業物質を充填したダクトは、全体でディスク形状をなすよう円周方向に配置されユニット化されている。永久磁石はこのユニットを挟み込むように配置される。永久磁石が回転することで各ダクトは励磁または消磁される。磁気回路は、150 W 級の磁気冷凍機[2]にも用いた円環状ハルバツハ配列磁気回路構成とした。

本磁気冷凍機は、上記のような永久磁石-磁気作業物質充填ダクトの磁気回路を 2 組有している。一方のダクトユニット(ユニット A と称する)には Gd のみ、他方のダクトユニット(ユニット B と称する)には Gd とイットリウム(Y)の合金材料を配置し、カスケード構成とした。永久磁石と、ロータリバルブ(熱交換媒体流路切り替え用)は、1 つのモータで回転させており、これらは同期運転される。温度スパンは Fig. 1 に示す T_{in} と T_{out} の差とした。

3. カスケード構成およびダクトの改良

ユニット B のダクトには (T_c) の異なる 3 種類の磁気作業物質が充填されていたが、ダクト出入口の流路断面積に比べ、ダクト中央部の断面積が半分程度となっており、熱交換を行う流体(水)の流速が材料の配置箇所と異なるなど、ユニット B の熱交換条件が複雑となり、温度差は 7.8 K にとどまった。そこで、構成を単純化して影響をみるため、ユニット B も単一材料にすることを検討した。

充填材料は、 T_c を 10°C に調整した GdY を用いた。ユニット B の充填材料を変更した後のユニット A, B のダクトを直列に接続したカスケード試験では、最大温度差 21 K を得ることができた(Fig. 2)。

さらに、磁気作業物質充填ダクトを折り返し形状から直線形状とし、材質を SUS から樹脂にするなどの見直しを行った。改良ダクトを搭載した磁気冷凍機を再組立後、ユニット A の単独運転試験を行い、温度スパン 15 K を得た(Fig. 3)。ユニット B(GdY (T_c 10°C))の単体運転では、最大温度スパン 10 K を得た(Fig. 4)。

4. まとめ

ユニット A(Gd)、ユニット B(GdY)とした場合には、最大温度差 21 K を得ることができ、カスケードの機能を確認した。

改良ダクトを用いた冷却試験では、ユニット A, B 各々の冷却温度スパンは、12 K → 15 K、7.8 K → 10 K といずれも拡大し、改善傾向を確認することができた。これは、ダクト形状をストレ

ートにしたこと、ダクトの熱容量ならびに熱伝導が低減した効果と考えられる。

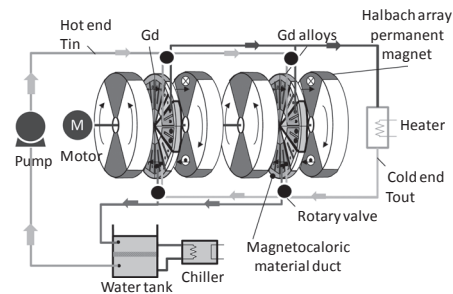


Fig. 1 Schematic of the kW-class magnetic refrigerator

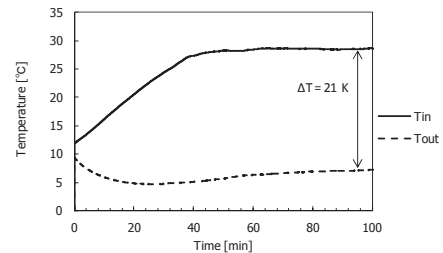


Fig. 2 Temperature in the case of unit A-B cascade

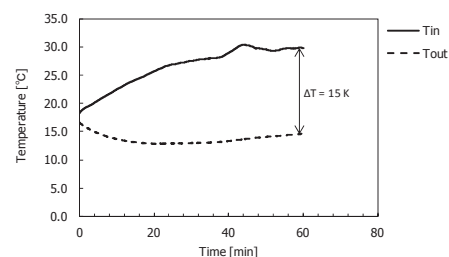


Fig. 3 Temperature of improved unit A (Gd)

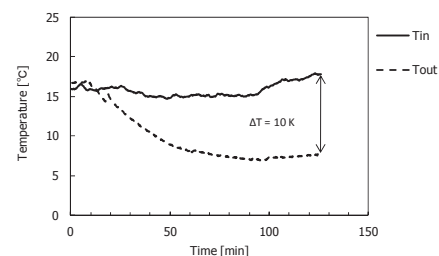


Fig. 4 Temperature of improved unit B (GdY-GdY)

本研究は、独立行政法人新エネルギー・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。

参考文献

- Y. Miyazaki, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 88, p. 68(2013)
- K. Waki, et al.: RTRI REPORT Vol.26, No.5, p.47 (2012)

磁気冷凍用 $\text{La}(\text{Fe}_{0.88}\text{Si}_{0.12})_{13}$ 水素化物の特性評価 —成形体の熱伝導率—

Measurements of Thermal conductivity of $\text{La}(\text{Fe}_{0.88}\text{Si}_{0.12})_{13}$ hydride

村山 大樹, 竹下 実里, 川田 尚明, 阿部 聡, 松本 宏一(金沢大); 高田 裕章(三徳)

MURAYAMA Daiki, TAKESHITA Misato, KAWATA Naoaki, ABE Satoshi, MATSUMOTO Koichi (Kanazawa Univ);

TAKATA Hiroaki (SANTOKU)

E-mail: rjb53879@gmail.com

1. はじめに

我々は磁性体の磁気熱量効果を利用した磁気冷凍に用いる磁性材料を研究している。室温近傍で用いる磁性材料に関しては、 $\text{La}(\text{Fe}_{0.12}\text{Si}_{0.88})_{13}$ 系について磁気熱量効果や熱膨張・磁歪について報告してきた[1]。

磁性体の熱伝導率を知ることは実用性の点から重要である。本研究では、定常法を用いた熱伝導測定系を作製した。この装置を用いた $\text{La}(\text{Fe}_{0.12}\text{Si}_{0.88})_{13}$ 水素化物の熱伝導率測定について報告する。

2. 熱伝導率測定装置

熱伝導率の測定には様々な方法がある。本研究では、試料に定常熱流を与え、試料の温度勾配を測定することで熱伝導率 κ を求める定常法を用いた。

$$\dot{Q} = -\kappa S \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

κ [W/mK] : Thermal conductivity

\dot{Q} [W] : Heat flow through the sample

ΔT [K] : Temperature difference between thermometers

S [m²] : Sectional area of the sample

Δx [m] : Distance between thermometers

熱伝導測定セルの概略を示す(Fig.1)。セルは、(a)ヒーター、(b) 高温側温度計、(c) 低温側温度計、(d)試料ホルダー(e) 輻射シールドからなる。試料と各部品の機械的固定、熱的接触には M2 ネジを用いた。各部品は無酸素銅(OFC)で作製した。

今回の測定は室温付近を予定していたので、温度計はシリコンダイオード温度計 DT-670-SD (Lake Shore 社)を使用した。温度計は温度計ホルダーに銅板で挟んでネジで固定し、二つの温度計ホルダーは $\Delta x=10\text{mm}$ 程度の間隔を開けた。

ヒーターは抵抗値が $340[\Omega]$ になるよう、直径 $0.08[\text{mm}]$ のマンガニン線を巻いた。

ヒートリークの影響を計算したところ、真空容器への熱放射の影響が無視できない大きさであったので、輻射シールドを設けた。温度計やヒーターのリード線には直径 0.07mm のマンガニン線を用い、試料ホルダーに数周巻き付け、サーマルアンカーをとっている。温度計ホルダー、ヒーターと試料間、また、温度センサーと温度ホルダー間の熱接触をとるために、アピエゾン・グリスを用いた。真空容器ごと寒剤ベッセルに入れることができるように、セルの外形を直径 20mm 以下となるようにした。

3. 測定系の試験

いくつかの断面積の異なる SUS304 と黄銅をテスト試料として用い、測定装置の動作を検証した。測定条件の検討を行い、文献値と同様の熱伝導率が得られた。

4. 実験結果

測定試料である $\text{La}(\text{Fe}_{1-x}\text{Si}_x)_{13}$ 系化合物は 200K 近傍で常

磁性から強磁性に一次相転移し、転移温度近傍で大きな磁気熱量効果をもつ。 $\text{La}(\text{Fe}_{0.12}\text{Si}_{0.88})_{13}$ 系は水素化により転移温度が高くなることが知られている[2]。本研究の測定試料は $\text{La}(\text{Fe}_{0.12}\text{Si}_{0.88})_{13}$ を高周波溶解、均質化熱処理後、水素吸蔵を行った多結晶試料を用いた。試料の転移温度は、比熱測定によって 313K であることを確認した。また、試料は水素化すると、もろくなるため、冷凍機での実用的な使用を考え、樹脂で硬化、成形した、断面積 $S=5 \times 7[\text{mm}^2]$ 、長さ 18mm の直方体を用いた(Fig.2)。

室温近傍での測定では、 $\text{La}(\text{Fe}_{0.12}\text{Si}_{0.88})_{13}$ 水素化物の熱伝導率は $5[\text{W/mK}]$ 程度であり、樹脂成形をしない物質の熱伝導率より低下した[3]。それでも SUS304 の $1/3$ 程度の熱伝導率を持つことがわかった。

講演では、測定装置や測定結果の詳細について報告する。

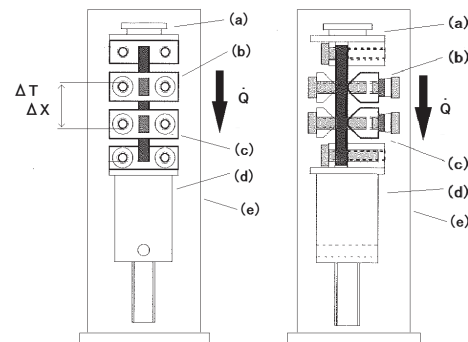


Fig.1 Schematics of thermal conductivity cell
(a)Heater (b)Thermometer (high temperature side)
(c)Thermometer (low temperature side) (d)Sample holder(e)Radiation shield

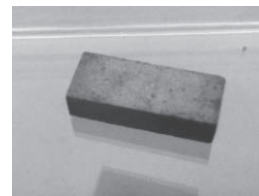


Fig.2 $\text{La}(\text{Fe}_{0.88}\text{Si}_{0.12})_{13}$ hydride sample

参考文献

1. M.Takeshita, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol.87 (2013) p.56
2. S. Fujieda, et al.: Appl. Phys. Lett. 79 (2001) 653
3. S.Fujieda, et al.: Journal of Applied Physics, Vol. 95 (2004) No.5

断熱消磁冷凍機用 3T 級小型ボビンレス超伝導磁石の開発

Development of a small bobbin-less superconducting magnet of 3T class for Adiabatic Demagnetization Refrigerators

高田 卓(NIFS); 木村誠宏(KEK); 原田 匠(筑波大学)

TAKADA Suguru (NIFS); KIMURA Nobuhiro(KEK); HARADA Takumi (University of Tsukuba);
E-mail:takada.suguru@LHD.nifs.ac.jp

1. 研究背景

宇宙機搭載用断熱消磁冷凍機(ADR)の構成要素の一つである超伝導ソレノイド磁石には、数A程度の比較的小さな電流によって数Tという比較的大きな磁場を得ることが要請され、同時にボア径が十分に取れる事、軽量であることが望まれる。ADRの冷凍能力はソレノイド磁石のボアに磁石と断熱を保ったまま、どれだけの体積の常磁性塩を設置できるかで決定される。そこで、ボアを出来るだけ大きくする工夫として、巻枠ボビンを排除した、ボビンレス超伝導磁石の開発を行った。

ADRに求められる超伝導磁石は、ボア径がおおよそ $\phi 10 \sim 50$ mm程度と小型のものが多く、巻枠のボビンが1 mm程度の極薄い場合であっても、これを排除する意味は大きい。大型の磁石では既に行われてきた手法[1]であるが、小型の超伝導ソレノイド磁石に適応した例は無く、この製作手法の確立を目指した。

2. ボビンレス小型超伝導ソレノイド磁石の製作

本開発では、 $\phi 0.127$ mm(絶縁被覆込)の安定化銅被覆のマルチフィラメントNbTi線(Type54S-43:Supercon Inc.)を用いた。極細であるため、非常に切れやすく1.5 N程度の張力で切れてしまう。そのため、3 N未満の張力制御を0.1 Nオーダーで調節可能な専用巻線機を開発し、0.8 Nの張力を保ちながら巻線を行った。4つ割のテフロンボビンを用意し、ここに一層ごとにエポキシ樹脂(ニトフィックス SK-227:日東電工社)を塗り、巻き終わり樹脂が硬化した後にボビンを内側に引き抜いてボビンレスソレノイド磁石を作成した。エポキシ樹脂は、極低温においても剛性を保持する物の中から、塗り巻きの作業性のため、硬化するまでの時間が比較的長く、粘度が高いニトフィックスを採用することとなった。熱伝導率については実測し確認した(Fig.1)。エポキシ樹脂の粘度が高いことから、気泡の混入が懸念されたが、断面観察を行う限りにおいて気泡の混入なくコイルが巻かれていることが判る(Fig.2)。ADRのシステムとして組み込むために両端にベースプレートとしてアルミリングを配しているが、これらはエポキシ樹脂のみで接着された状態である。さらに、マグネット全体の熱伝導度を担保するために短冊状のアルミ箔を中央の層に挟み込み、最内層と最外層に張り付けている。

製作にはTable.1の仕様の超伝導磁石で、おおよそ1週間の日数であった。

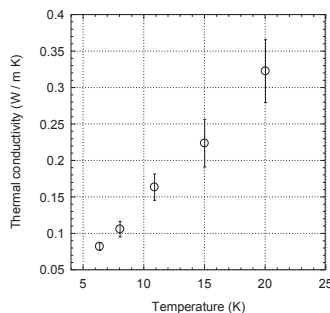


Fig.1 Temperature variation of thermal conductivity of the epoxy resin (Nitofix SK-227)

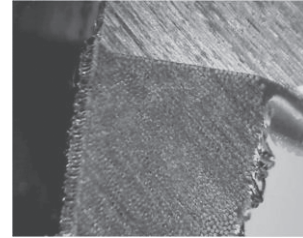


Fig.2 A picture of cross-section of the bobbin-less magnet

Table.1 Specification of the magnet

Inner Diameter	31.0 mm
Outer Diameter	47.4 mm
Height	65 mm
Turn	26531 turn
Total length of superconducting wire	3026.4m
Inductance	7.2 H

3. 励磁試験結果

製作した超伝導磁石を大気圧下の飽和液体ヘリウムによる浸漬冷却下で励磁試験を行った際の中心磁場の測定結果をFig. 3に示す。磁場測定は極低温用ホール素子を用いて測定を行っている。クエンチをしないまま約6 Aの通電に対して中心磁場3 Tを記録し、蓄積エネルギー131 Jに至った。これにより、使用したエポキシ樹脂がフープ力に十分耐えることや製作方法に問題のないことが確認できた。線材自身のJ_c及びB_c特性を鑑みると、おおよそ6.5 A中心磁場で3.25 T程度で線材特性による臨界電流、臨界磁場に至るソレノイド磁石であり、本試験は線材の性能限界の92%まで通電を達成している。

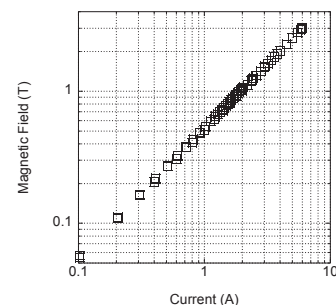


Fig.4 Measurement results of center magnetic field of the magnet in saturated LHe bath on the atmospheric pressure

参考文献

1. Y. Makida et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. 17(2007), pp.1205-1208

謝辞

本実験は、高エネルギー加速器研究機構の豊田恵嗣氏、村上巖氏並びに東京大学大学院生 榎原 祐資 氏の協力を得ました。ここに感謝します。

センサー冷却用断熱消磁冷凍機の開発 -REBCO 線材の伝熱特性及び断熱消磁試験-

Continuous ADR system for sensor cooling -Heat transfer characteristics of REBCO tapes and test of adiabatic demagnetization-

植田 隼治 (NIMS,千葉大); 沼澤 健則 (NIMS); 中込 秀樹 (千葉大); 都丸 隆行 (KEK); 李 晶 (千葉大)
UEDA Shunji (NIMS, Chiba Univ.); NUMAZAWA Takenori (NIMS); NAKAGOME Hideki (Chiba Univ.);
TOMARU Takayuki (KEK); Jing Li (Chiba Univ.)
E-mail: s-ueda@chiba-u.jp

1. はじめに

X線天文学の分野において、宇宙背景放射の偏光測定に使用する TES 型 X線マイクロカロリメータを 100mK まで冷却することが求められている。そこで我々は、連続冷凍が可能な連続作動型断熱消磁冷凍機(Continuous ADR)の開発を行っている。これまでに、パワーリードに高温超伝導線材である REBCO 線材を使用する事による CADR クライオスタットへの熱侵入の影響を評価してきた。

本報告では、実際に CADR クライオスタットを製作し、REBCO 線材の保護層 Ag による熱伝導の影響を評価したことについて報告するとともに、CADR の stage4 のユニットの断熱消磁試験の結果について報告する。

2. 実験及び試験方法

本研究では、CADR クライオスタットを用いて実験及び試験を行っている。Fig.1 に本研究の CADR クライオスタットの構造図及び写真を示す。なお、クライオスタットを冷却する 0.1W 型 4K-GM 冷凍機は 2 つのステージで構成されており、1st stage は 60K シールド、2nd stage は 4.2K シールド(4.2K Baseplate)と熱的に接触している。

本研究では、厚さ 0.1mm、幅 5.0mm、保護層 Ag の厚さ 6.5 μm の REBCO 線材を、60K~4.2K シールド間で使用している。今回、保護層 Ag による熱侵入量の軽減を図るため、線材中心部分の保護層 Ag を幅 2mm 削ったものを 2 本接続し、測定を行った。

次に、4.2K Baseplate に CADR の stage4 のユニットを設置し、断熱消磁試験を行った。stage4 は stage1~3 の排熱の役割を持つため非常に重要なユニットである。超伝導マグネットには、0.1mm の極細 NbTi 超伝導線を使用しており、巻き数は 46640 ターンである。磁性体には GLF(=GdLiF4)を 66g 使用しており、電流値を 3A とし、約 4T の磁場を与える。今回、断熱消磁時の温度の目標を 1.4K とし、測定を行った。

3. 結果と考察

Fig.2 に REBCO 線材の中心部分の保護層 Ag を幅 2mm 削る前と後の測定結果を示す。2 つの図を比較すると、削った場合の温度が若干高いが、この違いは測定上の誤差であると推測できる。今回熱侵入量の軽減を図るために保護層 Ag を削ったが、効果を示すことができなかった。

次に、断熱消磁試験の結果を Fig.3 に示す。励磁前は 3.2K であり、励磁を行うことにより温度上昇を始め、GM 冷凍機による排熱によって温度が安定したところで消磁を行うことで 1.63K まで温度が下降したが、目標値である 1.4K を達成することができなかった。

上記の結果の詳細については、当日に報告する。

4. まとめ

熱侵入量軽減のため REBCO 線材の保護層 Ag の中心部を削ったが、効果がみられなかった。また、断熱消磁試験にお

いては、断熱消磁時の温度が 1.63K となり、目標値である 1.4K を達成できなかった。今後は、REBCO 線材の幅を半分とすることで、伝熱特性の評価を行うとともに、ADR stage4 においては、ADR 内に充填されている熱交換ガスに着目し、改善を図る予定である。

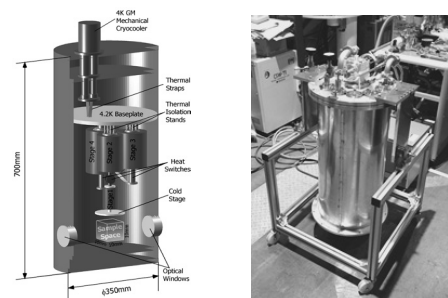


Fig.1 Schematic and picture of the CADR cryostat

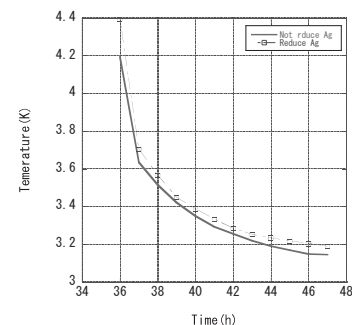


Fig.2 Comparison of the temperature

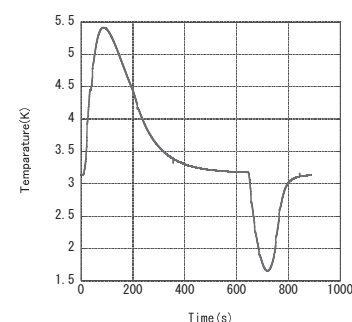


Fig.3 Result of adiabatic demagnetization

謝辞

本研究は、科学研究費助成事業(新学術領域研究「背景放射で拓く宇宙創成の物理」)において実施されている。

参考文献

- [1] Shirron, P., et al., "A compact, high-performance continuous magnetic refrigerator for space missions", Cryogenics 41 (2002) 789-795

鉄道用超電導ケーブル用ベローズ式ポンプの開発 Development of bellows-type LN₂ pump for superconducting cable for railway

富田 優, 鈴木 賢次, 福本 祐介, 石原 篤, 赤坂 友幸, 小林 祐介(鉄道総研)

TOMITA Masaru, SUZUKI Kenji, FUKUMOTO Yusuke, ISHIHARA Atsushi, AKASAKA Tomoyuki, KOBAYASHI Yusuke (RTRI)
E-mail: tomita@rtri.or.jp

1. はじめに

直流電気鉄道におけるき電システムへの適用を目指した超電導ケーブルの開発を進めている[1][2]。超電導ケーブルを鉄道の送電線に応用することで、き電電圧補償、変電所間の負荷平準化や変電所の集約、回生失効の低減などの効果が期待できる。鉄道用超電導ケーブルは、数百m～数kmの長さとなることから、ケーブルを液体窒素により循環冷却するためには、より高揚程、大流量のポンプが必要となる。効率の向上やキャビテーション防止を目的として、ベローズ式ポンプの開発を行い、その性能評価を行ったので報告する。

2. 仕様

ベローズ式ポンプの仕様を表1、模式図を図1に示す。本ポンプは、上部に設けられた電動アクチュエータの往復運動により、ベローズを繰返し、伸縮させ、その体積変化で液体窒素を送り出す構造である。また、流量や吐出圧力の変動(脈動)を低減させるため、大口径と小口径のベローズ、及び逆止弁を組合せ、体積変化を行う空間を2箇所設け、それらが交互に吸込、吐出を繰り返す。

3. 性能評価

製作したベローズ式ポンプの完成写真を図2に示す。また、図3に性能試験結果を示す。吐出流体に水としたとき、所定の性能が得られ、脈動の発生がなく、安定した流速特性、吐出圧特性を確認した。また、当日は液体窒素による試験状況についても報告する。

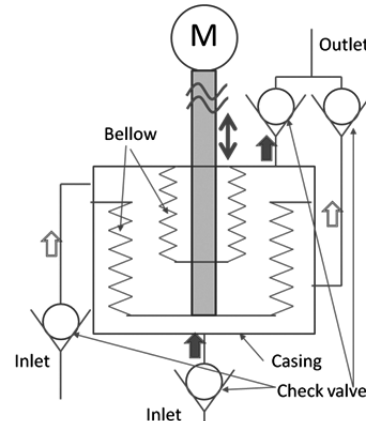


Fig.1 Schematic diagram of bellows-type LN₂ pump



Fig.2 Picture of bellows-type LN₂ pump

Table.1 Specification of bellows-type LN₂ pump

使用ベローズ	成形ベローズ(SUS316L)
吐出流体	液体窒素
差圧(ΔP)	最大 0.3 [MPa]
吸込側圧力	最大 0.2 [MPa]
吐出量	常用 10 [L/min](最大 20 [L/min])
設計圧力	0.6 [MPa] (フランジ部)
	0.3 [MPa(G)] (ケーシング部)

謝辞

本研究は、国土交通省の技術開発費補助金を受けて実施した。また、本開発では、イーグル工業(株)の協力を得た。

参考文献

1. M. Tomita, et.al: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 81 (2009) p. 21
2. M. Tomita, et.al: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 88 (2013) p. 30

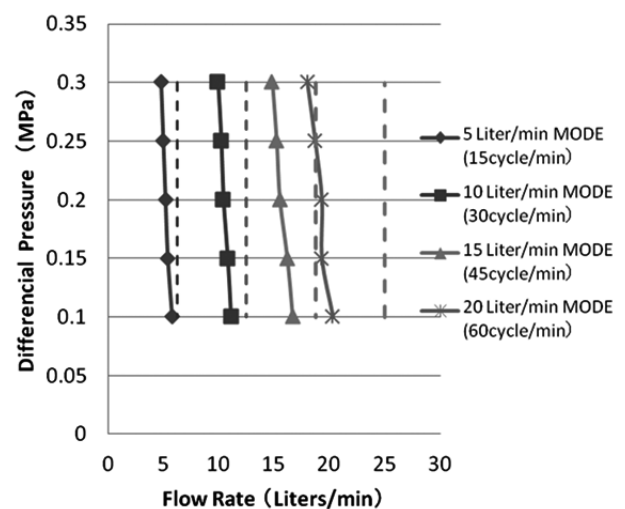


Fig.3 Bellows-type LN₂ pump performance curve for water (Dashed lines mean calculated curves by volumetric change inside casing)

無絶縁 REBCO 線材を巻線した m 級パンケーキコイルの励磁特性解析・評価

Analysis of Magnetic Excitation Characteristic of No-Insulation REBCO Coil

池田 愛花, 大木 隆広, 王 韜, 王 旭東, 石山 敦士(早大);野口 聡(北大);渡部 智則, 長屋 重夫(中部電力)
 IKEDA Aika, OKI Takahiro, WANG Tao, WANG Xudong, ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.); NOGUCHI So (Hokkaido Univ.);
 WATANABE Tomonori, NAGAYA Shigeo (Chube Electric Power Co., Inc)
 E-mail: atsushi@waseda.jp

1. はじめに

無絶縁 REBCO 線材を巻線したコイル(以下「無絶縁(NI:No-Insulation)コイル」)を用いることで, 本来, 二律背反の関係にある, 高電流密度化と高熱的安定化の両者を満足する設計の可能性が期待できる。一方, NI コイルを励磁する際, コイル内の過渡的電流分布により, 通電電流の変化に対して発生磁場に遅れが生じることが報告されている[1][2]。今回は, 先行研究において行われたモデルコイルによる実験[1]を対象に, 層間接触抵抗 R_c の値を変化させたときの NI コイルの励磁特性について解析・評価を行ったので報告する。

2. 解析手法

モデルコイルの諸元を Table.1 に示す。今回 Fig.1, 2 に示す 2 種類の回路モデルにより数値解析を行った。Fig.1 の回路モデルを用いた解析(簡易解析)では, NI コイル内の電流パスを径方向・周方向の 2 つのみとしている。通電電流 I_{op} , 周方向電流 I_{θ} , 超電導層電流 I_{sc} , 安定化層電流 $I_{stabilizer}$, コイルインダクタンス L_{coil} , 層間接触抵抗 R_c , 安定化層の抵抗 $R_{stabilizer}$ である。なお, 超電導特性には n 値モデルを用いた。一方, Fig.2 の回路モデルを用いた PEEC(Partial Element Equivalent Circuit)解析では, NI コイルの内部の電流分布をさらに詳細に明らかにするためにコイルを周方向に 8 分割し, 周・径方向電流 I_{θ} , I_r を考慮している。回路方程式を以下に示す。 R_{θ} は超電導層の特性を考慮した抵抗である(今回は負荷率 60% であることから十分小さい値とした)。 M はコイルの各ターンについて周方向に 8 分割したインダクタンスマトリクスであり, Neumann の公式を用いて計算した。

$$\{R_{\theta}\}\{I_{\theta}\} + \{M\}\left\{\frac{dI_{\theta}}{dt}\right\} - R_r I_r = 0$$

$$I_{\theta x-1} + I_{rx-M} = I_{\theta x} + I_{rx}$$

それぞれの回路モデルにおいて I_{θ} , I_r を求め, コイル中心の磁束密度 B_z を計算し実験結果と比較した。

3. 解析結果・まとめ

結果の一例として 60-turn コイルの励磁特性を Fig.3 に示す。通電電流に対する理想的な磁場を $B_z[ideal]$ としている。実験における $B_z[ideal]$ に対する励磁遅れを, 簡易および PEEC 解析結果ともによく再現できていることがわかる。次に, m 級(内径:1000mm, 270 ターン, 中心磁場:33mT@100A, インダクタンス:205mH)コイルの場合について, 簡易解析を用いて励磁特性を評価した。先行研究による実験[1]より求めた層間接触抵抗 R_{ct} ($=70 \mu \Omega \cdot cm^2$) を 1, 10, 100 倍することでパラメータとしている。また, 通電電流の励磁速度を 1A/s とし, 最大電流は 100A とした。その結果を Fig.4 に示す。また, 各接触抵抗における励磁遅れ時間を Table.2 に示す。ここでは, 通電電流が最大値に達してから磁場 B_z が定常状態(最大値の 99%)になるまでの時間を励磁遅れ時間としている。m 級 NI コイルでは実験値から求めた接触抵抗 $R_{ct}=70 \mu \Omega \cdot cm^2$ を用いると約 8000 秒の励磁遅れが生じ, 接触抵抗の値を大きくすることで励磁遅れ時間が小さくなることからわかる。実験値の 100 倍の接触抵抗 $R_{ct}=7000 \mu \Omega \cdot cm^2$ では励磁遅れ時間は約 50 秒(Table.2 中の括弧内の数字は PEEC 解析結果)となった。今後は, 実応用を想定し, 多段積みされた NI パンケーキコイルの特性等について検討していく予定である。

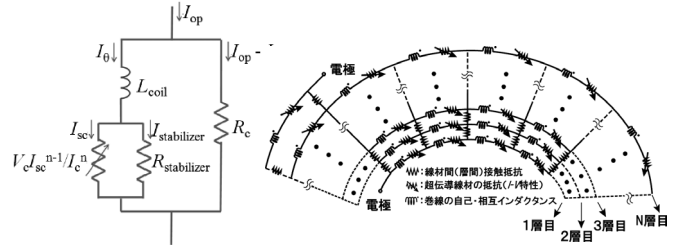


Fig.1 Simple equivalent circuit Fig.2 Partial Element Equivalent Circuit model for an NI REBCO coil model for an NI REBCO Coil

Table.1 Parameters of No-Insulation REBCO pancake coils

Parameter	NI20	NI40	NI60
i.d.; o.d. [mm]	60.0; 62.5	60.0; 65.0	60.0; 67.6
Number of Turns	20	40	60
I_c (@77K, self-field) [A]	54	47	43
Inductance [μH]	51.7	198.4	432.3
Characteristic resistance [$\mu \Omega$]	186	360	534

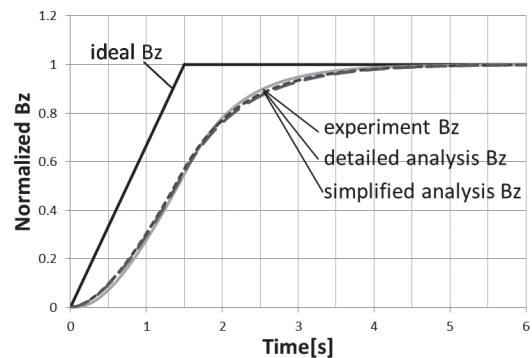


Fig.3 Results of axial field B_z (60-turn coil)

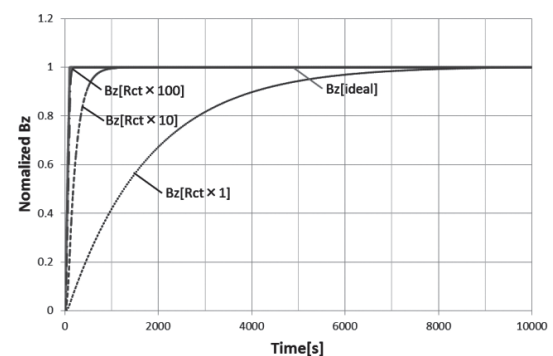


Fig.4 Situation Results axial field B_z as parameter R_{ct} (270-turn m-calss coil)

Table.2 Delay time for magnet excitation (270-turn)

$R_{ct}=70 \mu \Omega \cdot cm^2$	$R_{ct} \times 1$	$R_{ct} \times 10$	$R_{ct} \times 100$
Time[s]	7995	760	50 (49)

参考文献

- Xudong Wang, et al.: Supercond. Sci. Technol., 26 (2013) 035012
- Hahn S, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., 21 (2011) 1592-5

無絶縁 REBCO 線材を巻き線したパンケーキコイルの層間接触抵抗の解析・評価 Analysis of Turn-to-Turn Contact Characteristics of No-insulation REBCO Pancake Coil

大木 隆広, 池田 愛花, 王 韜, 王 旭東, 石山 敦士(早稲田大学);野口 聡(北海道大学);
Seungyong Hahn, 岩佐 幸和(MIT); 渡部 智則, 長屋 重夫(中部電力)

OKI Takahiro, IKEDA Aika, WANG Tao, WANG Xudong, ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.); NOGUCHI So (Hokkaido Univ.);
SEUNGYONG Hahn, IWASA Yukikazu (MIT); WATANABE Tomonori, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power Co., Inc)
E-mail: atsushi@waseda.jp

1. はじめに

無絶縁 HTS 線材を巻き線したコイル(「無絶縁(NI:No-Insulation)コイル」と呼ぶ)は, 本来二律背反の関係にある高電流密度化と熱的安定性の両者を満足する設計が可能になると期待されている[1, 2]。一方でコイル内部の電磁的・熱的現象の詳細は明らかになっていない。今回は NI コイルの電磁気的特性について PEEC(Partial Element Equivalent Circuit)解析を行い, 先行研究の実験結果と比較評価したので報告する。

2. 実験・解析方法

本実験に用いたコイルの諸元を Table.1 に示す。実験は 60 ターンのコイルから巻き線張力を一定に保ちながら 20 ターンずつ巻きほくことで作製した 3 種類のシングルパンケーキコイル[1]において, 電流ホールド状態(30A, $I_r/I_c=0.6$)から電源を遮断する試験を行った。このときのコイル中心磁場の減衰から層間接触抵抗を求めた[1, 3]。NI コイルはターン間の超電導線材同士が電氣的に接触している。そのため NI コイル内の電流分布を明らかにするためにはコイル巻線を細かい要素に分割し, ターン間の接触抵抗を考慮した回路モデルが必要となる。そこで Fig.1 に示すような PEEC を構成し, 電流分布解析を行った。式(1)(2)に回路方程式を示す。

$$\{R_\theta\}\{I_\theta\} + \{M\}\left\{\frac{dI_\theta}{dt}\right\} - R_r I_r = 0 \quad (1)$$

$$I_{\theta x-1} + I_{rx-M} = I_{\theta x} + I_{rx} \quad (2)$$

回路は径方向と周方向で構成される。ここで R_θ は径方向の接触電気抵抗で, 遮断試験[1]より算出した値を用いた。 R_r は周方向(線材長手方向)の抵抗成分である(今回は負荷率 60% であることから十分小さい値とした)。 M はコイルの各ターンについて周方向 8 分割したインダクタンスマトリクスであり, ノイマンの公式より求めた。電源遮断後の周方向の電流 I_θ , 径方向の電流 I_r の計算を行った。また, 求めた I_θ を用いて, 中心軸上の磁束密度 B_z を計算し実験値と比較した。

3. 解析結果

結果の一例として 60 ターンコイルについて初期値で規格化した実験結果と解析結果を Fig.2 に示す。また, Table.2 に各パラメータを示す。Fig.1 より 30A でホールドした状態から電源を遮断した場合, 解析結果は実験結果をよく再現している。よって今回のような小口径コイルにおいては, PEEC 解析によって層間接触抵抗を評価することができた。今後は巻数が多い大口径コイルについて検討を進めていくとともに, PEEC 解析を用いて局所的常電導転移が発生したときの NI コイル内部の熱的, 電氣的振る舞いを評価していく予定である。

Table.2 Simulation Parameter and Results

	Parameter		Result	
	$L_{coil}(\mu H)$	$R_{ct}(\mu\Omega \cdot cm^2)$	実験 τ (ms)	解析 τ (ms)
NI-20	51.2	75.3	277	356
NI-40	196.9	72.4	552	625
NI-60	429.4	72.4	810	882

Table.1 Specifications of No-Insulation REBCO pancake coils

Parameter	NI-20	NI-40	NI-60
REBCO conductor			
Overall width; thickness(mm)	4.0; 0.063		
Copper stabilizer thickness(μm)	10(5 per each side)		
$I_c @ 77K, self-field(A)$	> 100		
Coil			
i.d(mm)	60	60	60
o.d (mm)	62.5	65.0	67.6
Height(mm)	4	4	4
Turns	20	40	60
$I_c @ 77K, self-field(A)$	54	47	43
B_z per amp at center(mT/A)	0.41	0.80	1.17

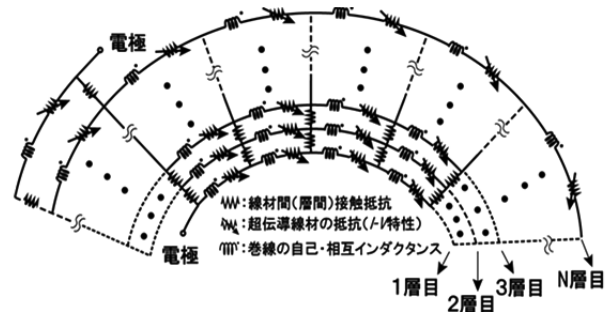


Fig.1 Partial Element Equivalent Circuit for an NI REBCO coil

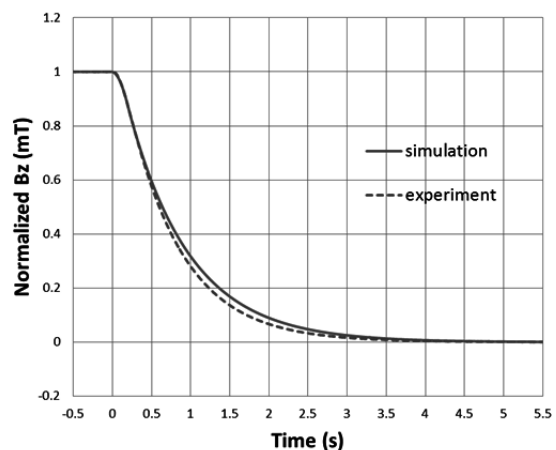


Fig.2 Results of sudden discharge tests(60-turn NI coil)

参考文献

- X.Wang, et al.: Supercond. Sci. Technol., Vol. 26 (2013) 035012
- S.Hahn, Y.Iwasa et al.: IEEE Trans. On Applied Superconductivity, Vol. 21 (2011) 1592-5
- E.Nakada, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 88 (2013) P.141

REBCO コイルにおける遮蔽電流による不整磁場の低減

Reduction of Magnetic Field Generated by Screening Current in REBCO Coil

持田 歩, 王 韜, 有谷 友汰, 齋藤 隼, 王 旭東, 石山 敦士(早大); 植田 浩史(阪大);
 MOCHIDA Ayumu, WANG Tao, ARIYA Yuta, SAITO Jun,
 WANG Xudong, ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.); UEDA Hiroshi (Osaka Univ.);
 E-mail: atsushi@waseda.jp

1. はじめに

近年、高温超電導技術を応用して医療用加速器や MRI, NMR などの設計・開発が進められている。REBCO 線材はテープ形状をしているため、垂直磁場の影響を大きく受け、遮蔽電流が顕著に誘導され、それによって不整磁場が発生する。この不整磁場により発生磁場の空間的均一性や時間的安定性を損なう可能性があるため、我々はこの不正磁場の磁場分布を測定・評価してきた⁽¹⁾。今回は、REBCO 超電導コイルの遮蔽電流により発生する不整磁場を低減することを目的に、細線化と負荷率に焦点を当て、三次元電磁場解析⁽²⁾により評価を行ったので報告する。

2. 解析対象コイル

今回想定した REBCO モデルコイルの諸元を Table 1 に示す。線材は幅 4 mm、基板層 75 μm 、銅層 20 μm 、REBCO 層 1 μm とした。コイルは、巻数を 250、内径 100 mm、外径 170.5 mm のパンケーキコイルを 8, 10, 12, 16 段とスタックしていずれも中心磁場 3T を発生するようにした。コイルのスタック数を 8, 10, 12, 16 段と増やすと 3 T を発生するための通電電流は小さくなり、負荷率が下がることになる。以上の4つのコイルを対象に負荷率の変化に対して遮蔽電流による不整磁場を三次元電磁場数値解析⁽²⁾を用いて評価した。さらに、各コイルにおいて線材を 2 分割、4 分割と細線化したときの遮蔽電流による不整磁場についても評価した。解析に際しては、超電導の電流-電圧特性は n 値モデルを採用し、 I_c の磁場依存性を考慮した。

3. 解析結果

巻線内(上半分)の径方向の磁場 B_r の分布を Fig. 1 に示す。さらに、各コイルにおける細線化していない場合と、2 分割した場合の電流分布を Fig. 2 に示す。コイル径方向(テープ幅広面垂直方向)の磁場がコイル両端で大きくなるため、遮蔽電流も流れやすくなる。一方、中央のコイルにはほとんど流れていない。負荷率 (I/I_c) は、コイル径方向の磁場が大きくなり I_c が低下している端のコイルの I_c に依存することになる。また、線材内の電流分布は、通電電流と遮蔽電流の和の電流が超電導線材の電流-電圧特性に従って決定される。従ってコイルのスタック数が少ないと(負荷率が上がると)、端のコイルにおいて、線材内の電流は通電電流が流れる領域が多くなり、遮蔽電流が流れる余地が少なくなることがわかる。Fig. 3 に通電

電流とコイル中心の遮蔽電流磁場の関係を示す。負荷率が上がるにしたがって、遮蔽電流磁場が小さくなる。これは、上述したように、線材内で通電電流が流れる領域が広がり、遮蔽電流が流れる余地が少なくなるためである。また、細線化することによって遮蔽電流磁場が抑制される。細線化することによって、細線一本あたりに流れる遮蔽電流が抑制されるためと考えられる。特に負荷率が 6 割以上の時 (Fig.3(b) の点線部) は、遮蔽電流による不整磁場の影響が 1% 以下となっている。また、スタック数一定として巻き厚を変化させた場合も解析・評価している。

なお、本研究の一部は科研費(基盤研究 C:25420253)に依ったことを付記する。

参考文献

1. Y. Ariya, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol.88(2013) p.145.
2. H. Ueda, et al.: IEEE Trans Appl Supercond, Vol.23, Issue:3, Part:2, (2013), 4100805.

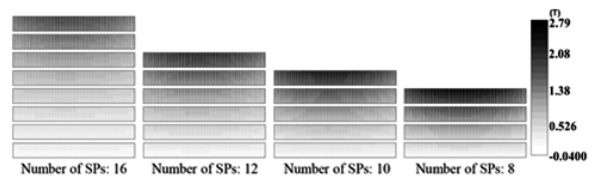


Fig. 1. Radial component of magnetic field in cross-section of winding.

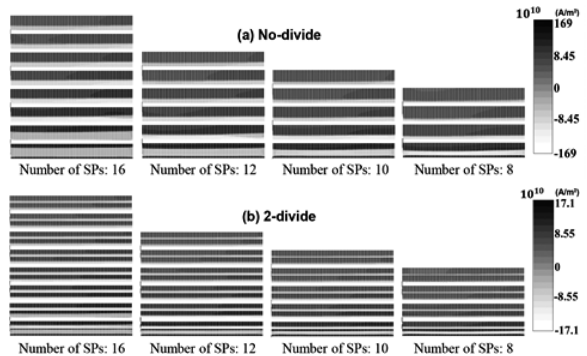


Fig. 2. Current distributions in cross-section of winding.

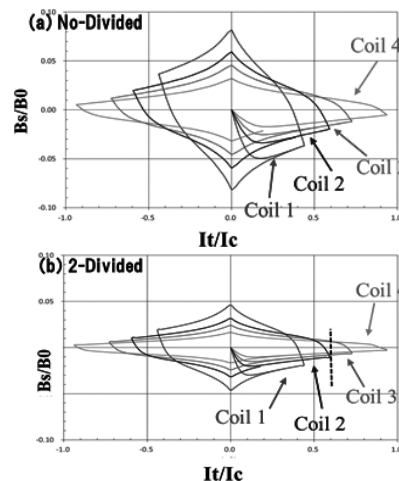


Fig. 3. Numerical results of magnetic field generated by screening current.

Table 1 Specifications of REBCO Coils.

	Coil 1	Coil 2	Coil 3	Coil 4
Inner diameter (mm)	100.0	100.0	100.0	100.0
Outer diameter (mm)	170.5	170.5	170.5	170.5
Height (mm)	79.0	59.0	49.0	39.0
Turns/Single Pancake	250	250	250	250
Number of SPs	16	12	10	8
Insulator between turns (μm)	25	25	25	25
Gap between SPs (mm)	1	1	1	1
Current, I_t (A)	92.6	115.8	135.1	164.9
I_c (A) @ 1 $\mu\text{V}/\text{cm}$	211.2	195.4	186.1	176.0
Load factor (I_t/I_c)	0.439	0.593	0.726	0.937
Magnetic field @ center (T)	3.0	3.0	3.0	3.0

非絶縁 REBCO 積層パンケーキコイルにおける電流モード転移が持つ危険性 Dangerousness of the current mode transition of uninsulated stacked-double pancake coils

名和 雅斗, 柳澤 杏子, 佐藤 耕太(千葉大); 柳澤 吉紀(理研); 中込 秀樹(千葉大); 前田 秀明(理研)
NAWA Masato, YANAGISAWA Kyoko, SATO Kota (Chiba Univ.); YANAGISAWA Yoshinori (RIKEN);
NAKAGOME Hideki (Chiba Univ.); MAEDA Hideaki (RIKEN)
E-mail: masato.nawa@riken.jp

1. はじめに

REBCO コイルでは、線材の特性を活かした高電流密度運転下において熱暴走が起きると、極めて短い時間でコイルが損傷する温度に至るため、保護ができない。コイルを熱暴走から保護する手法として、ターン間の絶縁を取り去った非絶縁法が提案されている。非絶縁 REBCO パンケーキコイルでは、コイル臨界電流以上で起こる自然熱暴走がトリガーとなり、電流分布が通常時のマルチターンモードからシングルターンモードに転移することで、熱暴走が自発的に回復することを我々は明らかにした[1]。本報では、非絶縁のダブルパンケーキコイルを積層したコイルにおける熱暴走・シングルターンモード転移現象について実験で調べ、課題を明らかにした。

2. 実験方法

SuperPower 社製の REBCO 線材 (SCS4050, 幅 4 mm, 厚さ 0.1 mm, 77 K での臨界電流 90 A, 総長 0.6 m) を使用して、内径 30 mm, 外径 31.2 mm, ターン数 12 (6×2) の非絶縁 REBCO ダブルパンケーキコイルを 6 個製作し、これらを積層することで積層パンケーキコイルとした。77 K におけるコイル臨界電流は 53 A である。ダブルパンケーキ同士は REBCO 線材を用いて半田接合した。各パンケーキコイル間は厚み 0.1 mm の FRP 製のシートで絶縁した。コイルを液体窒素中において、0.83 A/s の掃引速度でコイル臨界電流を超えて励磁した。電極間電圧と各パンケーキコイル電圧、コイル内の上端, 中心, 下端の 3 箇所 (それぞれ $B_{z,up}$, $B_{z,cent}$, $B_{z,low}$) のコイル軸方向磁場を測定した。

3. 実験結果

熱暴走・シングルターンモード転移は 74 A で始まった。このときの各パンケーキコイルにおける電圧を Fig.1(a) に示す。1~12 は各パンケーキコイルに上から順に付した番号である。1065~1070 s において、まずコイル中心付近の 8, 7 において、次いでその下部の 9, 10 において熱暴走が起きた。この時、Fig.1(b) に示すように、7~10 に近い位置にある、 $B_{z,cent}$ と $B_{z,low}$ において、シングルターンモード転移にともなう顕著な磁場減衰が見られた。

次に $t = 1080 \sim 1087$ s において、最下部のダブルパンケーキコイルである 11, 12 が熱暴走した (Fig.1(a))。同時に $B_{z,low}$ において磁場減衰が見られた (Fig.1(b))。この時点でコイルの下半分全てがシングルターンモードへ転移したことになる。

$t = 1095 \sim 1106$ s において 3, 4, 6, 5, 2, 1 の順でコイル上半分が全てシングルターンモード転移し (Fig.1(a))、対応する磁場減衰 (Fig.1(b)) が見られた。これですべてのコイルがシングルターンモード転移した。

以上のように、シングルターンモード転移は連続的に起こらず、3 回に分けて不連続に起きた。まず、7~10 において転移が起きたが、これにより、コイルの経験磁場が低下し、線材の臨界電流が上昇する。Fig.1(a) の矢印 A が示すように、7~10 の転移後、残る 1~6, 11, 12 における電圧が低下しているのはこのためである。すなわち、ある部分で転移が起こると、残りの部分では転移が起こりづらくなり、結果としてコイル全体としては不連続な転移を示すのである。ただし、ダブルパンケーキごとに見ると、片方のパンケーキがシングルターンモード転移

すると、すぐにもう一方も転移している。これはダブルパンケーキにおいて、最内層で上下のコイルが熱的・電氣的に接続されており、熱暴走が伝播するためである。

4. 考察

非絶縁 REBCO ダブルパンケーキコイルにおいては、ダブルパンケーキごとに熱暴走・シングルターンモード転移が起こることが明らかになった。実規模のコイルを想定した場合、この振る舞いはコイルに機械的な問題を引き起こす可能性がある。Terao [2] は、Bi2223 コイルを用いた 3 T MRI 磁石における熱暴走・クエンチ現象を報告している。この MRI は 5 個のレイヤー巻きコイルからなるマルチコイル磁石である。端部のコイルから熱暴走・クエンチ現象が始まった結果、そのコイルの磁場がなくなることでコイル軸方向の電磁力のアンバランスが生じ、電極部の破壊・アーク放電を伴って全てのコイルが損傷するに至った。本報で示したように、非絶縁 REBCO ダブルパンケーキコイルにおいても、ダブルパンケーキごとに個別にシングルターンモード転移を起こし、磁場が減少するため、軸方向の電磁力のアンバランスが生じる。すなわち、熱暴走から熱的に保護されたとしても、上述の MRI 磁石の場合と同じく機械的な理由でコイル損傷を起こす可能性が高いため、何らかの対策が必要である。

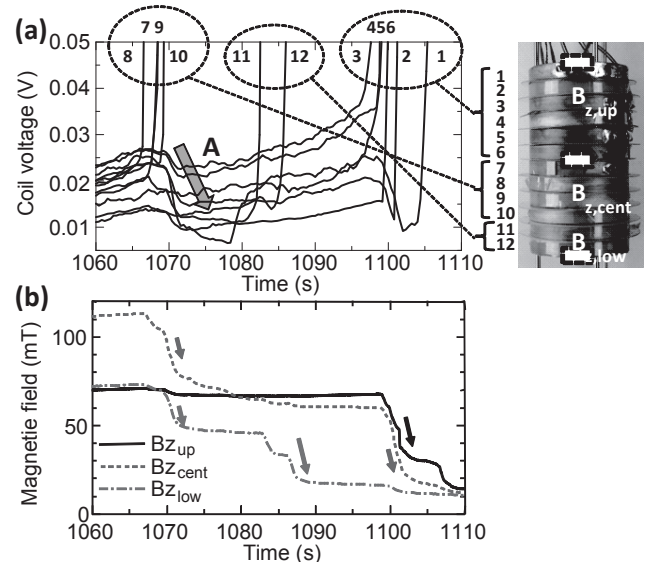


Fig.1 (a) Voltage for each pancake and (b) magnetic field during single-turn mode transition. Power supply current is increasing with the ramp rate of 0.83 A/s.

5. まとめ

非絶縁 REBCO ダブルパンケーキコイルを積層したコイルにおいては、シングルターンモード転移が不連続に起きる。実規模サイズのコイルでは電磁力のアンバランスにより大きな体積力が働くため、これを防ぐ対策が必要である。

参考文献

1. Yanagisawa et al, *Physica C*, **499** (2014) 40-44.
2. Terao et al, *IEEE TAS*, **24** (2014) 4401105.

REBCO コイルにおける外部磁場遮断の影響 II

Influences of external magnetic field shutdown on the REBCO coils II

武藤 翔吾, 土屋 雄司, 小黒 英俊, 淡路 智, 渡辺 和雄(東北大学);
宮崎 寛史, 花井 哲(東芝);大保 雅載, 飯島 康裕(フジクラ)

MUTO Shogo, TSUCHIYA Yuji, OGURO Hidetoshi, AWAJI Satoshi, WATANABE Kazuo (Tohoku Univ.);
MIYAZAKI Hiroshi, HANAI Satoshi (Toshiba); DAIBO Masanori, IJIMA Yasuhiro (Fujikura)

E-mail: s.muto@imr.tohoku.ac.jp

1. はじめに

希土類系高温超伝導 REBCO(RE:希土類元素および Y)線材は、強磁場特性に優れていることから、次世代の強磁場超伝導マグネットへの応用が期待されている。強磁場センターでは、この REBCO 線材を用いた 25T 無冷媒超伝導マグネット開発が進められている[1]。

REBCO コイルは高い電流密度で運転できることに強みを持つが、電源の誤動作や外側マグネットのクエンチなどのアクシデントにより、コイルの臨界電流 I_c を超えるオーバーカレントが流れた際、熱暴走を引き起こして焼損する例が報告されている。特に実用マグネットとしての信頼性を保証するためには、熱暴走が発生しても安全に保護する方法の確立が求められる。

REBCO コイルにオーバーカレントが流れる事故のひとつとして、アウトサートの低温超伝導マグネット(LTS マグネット)のクエンチが考えられる。LTS マグネットがクエンチすると、電磁誘導により REBCO コイルに電流が誘起され、回路構成によってはオーバーカレントが流れることになり、熱暴走を引き起こす。

このアクシデントに対する保護方法を確立するためには、熱暴走が発生する条件および、焼損する条件についての指針を与える必要がある。

前回は、LTS マグネットがクエンチした状況を模擬した外部磁場遮断試験を行い、REBCOコイルが熱暴走しても焼損しない場合についての結果を報告した[2]。

今回は、前回の熱暴走時における REBCO コイルの電流変化より磁場分布を計算し、磁場分布に起因する負荷率分布を基に、LTS マグネットクエンチ時のホットスポットの挙動について議論を行う。

2. 解析方法

実験および、解析に用いた試験コイルは二枚のシングルパンケーキ(CoilA, CoilB)を積層させた二積層シングルパンケーキコイル構成となっている。試験コイルの外側に NbTi マグネットが配置されているモデルを作成し、磁場強度分布に関して数値計算を行なった。熱暴走時における電流の実測値を用いて磁場分布の時間発展の計算を行った。この際、温度は一定と仮定した。用いた電流プロファイルを図.1 に示す。なお、参考として REBCO コイル内部で発生した常伝導電圧のプロファイルも同じグラフに示す。左軸が電圧、右軸が電流、横軸が時間であり、 $t = 0$ s のときに遮断を行った。

数値計算より求めた磁場の強度分布および、角度分布を基に、コイル内部での臨界電流密度 J_c 分布を計算した。 J_c の角度依存性は、典型的な REBCO 線材の一つである、SuperPower 社の試料の実測値に内挿して計算を行った。また、 J_c - B 特性に関しては、 $J_c \propto B^{0.5}$ と仮定して計算を行った。なお、電界基準は $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ である。

さらに、計算した J_c 分布を線材幅方向に平均を取って求めた径方向の J_c 分布を用い、コイル径方向の負荷率分布を導出した。なお、実際に計算を行った領域は、コイルの対称性を考慮し、上側シングルパンケーキの領域のみ計算した。

3. 解析結果および考察

コイル径方向の負荷率分布を Fig.2 に示す。なお、横軸はコイル最内層を原点としたときの位置、縦軸が負荷率である。Fig.1 の時間と対応し、 $t = 1.4$ s から 2.4 s まで 0.2 s 刻みで各時間における結果を示している。負荷率は時間発展に従い、ほぼ単調に増加し、 $t = 1.6$ s のとき、コイル最内層にて負荷率が1を超え、電圧が発生し始めたことがわかった。この結果は Fig.1 の $t = 1.6$ s 付近の常伝導電圧の立ち上がりと定性的に一致した。見積もられたホットスポットのサイズと、図1の結果からホットスポットの到達温度を見積もることで、焼損条件を検討する。

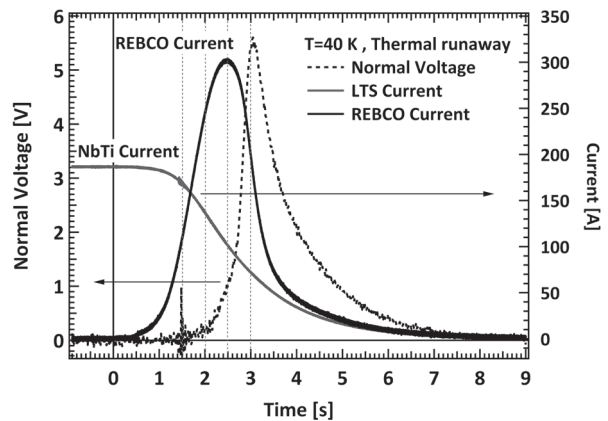


Fig.1 Voltage and current behaviors of the REBCO and the outer NbTi coils after a shut down of the LTS coil

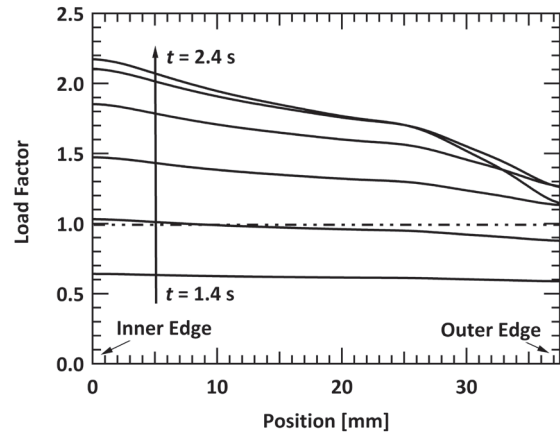


Fig.2 The load factor distribution in the REBCO coils at 1.4 - 2.4 sec. after the shutdown of the power source for LTS magnet.

謝辞

本研究の一部は科学研究費補助金(基盤 A)の補助を受けて実施しました。

参考文献

1. S. Awaji *et al.*, IEEE TAS, 24 (2014) 4302005 and Abstract of CSJ Conference **87** 3A-p05 (2013)
2. S. Muto *et al.*, Abstract of CSJ Conference **87** 1A-a02 (2013)

nPAD-YBCO®電流リードの機械的特性及び熱履歴の影響評価
 The durability of nPAD-YBCO® current lead against cooling cycles and mechanical stresses

高橋 亨, 引地 康雄, 箕輪 昌啓, 木村 一成, 小泉 勉(昭和電線), 山田 豊(東海大)
 TAKAHASHI Kyo, HIKICHI Yasuo, MINOWA Masahiro, KIMURA Kazunari,
 KOIZUMI Tsutomu (SWCC); YAMADA Yutaka (Tokai University)
 E-mail: k.takahashi043@cs.swcc.co.jp

1. はじめに

超電導線材を利用した応用機器には、外部電源と極低温の真空容器内の機器とを繋ぐ電流リードが必要である。電流リードは電力供給だけでは無く、熱流入を低減させる機能が必要となる。しかし、銅を用いた電流リードでは熱侵入量が多く冷却コストが高いという問題点があるため、超電導体を用いた電流リードが開発されている。

超電導電流リードは外部磁場がかかる場所に設置されることが多いため、磁場中での特性が優れている超電導線材を用いることで、使用線材の本数を減らし、熱侵入量の低減と小型化が可能となる。

我々は、磁場中での特性に優れた nPAD-YBCO®を用いて、通電容量や熱侵入量を改善した電流リードを開発した¹⁾。

機器によっては室温から極低温への冷却が繰り返し行われることから、電流リードには冷却サイクルによる通電性能への影響を把握することが必要となる。また、施工時などに想定される機械的応力に耐えられる強度も必要とされる。本報では、500A 級超電導電流リードの熱履歴の影響評価、使用超電導線材の機械的特性評価を行った結果を報告する。

2. 実験方法

今回、機械的特性及び熱履歴の影響評価に用いた電流リード仕様を Table1 に示す。線材は、幅 5mm、厚さ約 120μm (Hastelloy substrate: 100μm、REBCO layer: 1.5μm、Ag layer: 20μm) の nPAD-YBCO®を使用した。両端を Cu 電極にはんだ接合後、GFRP製支持部材で補強して超電導電流リードとした(Fig.1)。

熱履歴の影響評価は液体窒素中で I_c 測定後、室温に昇温し、冷却-昇温を 40 回繰り返し 10 回ごとに通電試験を行い、 I_c と接続抵抗の変化を確認した。接続抵抗測定は 4 端子法で行った。電圧端子は電流リード両端に接続した。

機械的特性は nPAD-YBCO®の特性把握を先に行った。引張試験は、液体窒素中で初期 I_c 値を測定後、室温にて所定の引張応力を印加し、除荷後、再び I_c 測定を行い初期 I_c 値と比較し、許容引張応力と許容引張歪の評価を行った。

3. 実験結果及び考察

熱履歴を 40 回経験させ所定の回数ごとに I_c 測定を行い初期 I_c 値(I_{c0})で規格化した結果、初期接続抵抗(R_0)で規格化した結果を Fig.2 に示す。いずれも、40 回熱履歴を経験して I_c の低下・接続抵抗の増大がないことを確認した。今後はさらに回数を重ねていく予定である。

次に、線材の降伏応力(1GPa)近辺の 0.8GPa、1.0GPa、1.2GPa の計 3 点で室温において、応力を印加し除荷後 I_c 測定を行った。引張応力依存性を Fig.3 (a)、引張歪依存性を Fig.3 (b)に示す。 I_c/I_{c0} が 0.90 を保持する応力、歪をそれぞれ許容引張応力、許容引張歪とした。測定した結果、許容引張応力は 1.0GPa、許容引張歪は 1.2%であった。

電流リードの機械的特性(片持ち曲げ試験等)、nPAD-YBCO®の曲げ歪依存性は講演にて報告する。

Table1 Specifications of 500A-class HTS current lead.

Rated current (A)(@77K-4.2K,0T)	500
Heat leakage(W)	≦0.06
Quantity of REBCO tapes	4
Size(mm)	14T×14W×220L



Fig.1 Appearance of 500A-class HTS current lead.

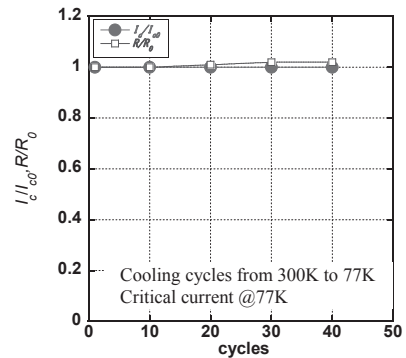


Fig.2 The influence of I_c due to cooling cycles of nPAD-YBCO® current lead

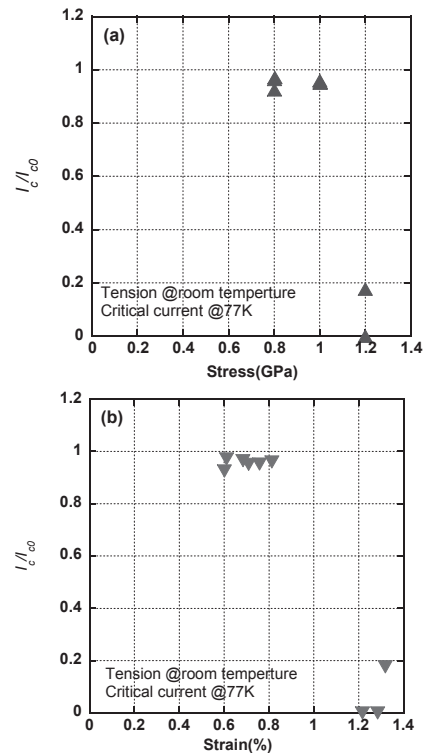


Fig.3 (a) The influence of I_c due to tension stress of nPAD-YBCO®
 (b) The influence of I_c due to tension strain of nPAD-YBCO®

参考文献

1. K.Takahashi, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 88 (2013) p.171

Y 系超伝導転位並列導体で構成したコイルの付加的交流損失特性(2)

Additional AC loss properties of REBCO superconducting parallel conductors (2)

梶木 優樹, 岩熊 成章(九大); 和泉 輝郎, 塩原 融(ISTEC)

TSUKIGI Yuki, IWAKUMA Masataka (Kyushu-Univ.); IZUMI Teruo, SHIOHARA Yuh (ISTEC)

E-mail:yuuki1087@gmail.com

1. はじめに

我々は大電流容量化を目指す酸化超伝導体の構成法として Fig. 1 に示すように素線を並列に並べ、巻き線途中で転位を施す方法を提案している。超伝導線材を用いて転位並列導体を構成すると素線に発生する交流損失に加え転位並列導体化に伴う損失が発生する。この損失のことを付加的交流損失と呼んでいる。本研究では実際の酸化超伝導線材の通電特性を模擬して n 値モデルを採用し、転位並列導体をコイルに巻いた場合の付加的交流損失の解析を行った。

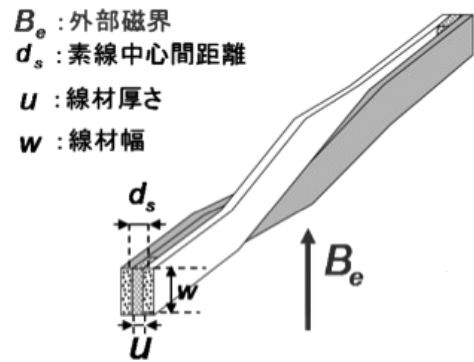


Fig.1 A transposed two-strand parallel conductor

2. 並列導体の付加的交流損失

Fig.2 は転位位置が中央から $\Delta\ell$ だけずれた並列導体の磁界方向投影図であり、転位の左右で鎖交磁束の差が生じ、それを打ち消すように遮蔽電流が発生する。遮蔽電流を導出する際に、n 値モデルによる素線抵抗 r を考慮すると、回路方程式は Fig.3 より、(1)式となる。

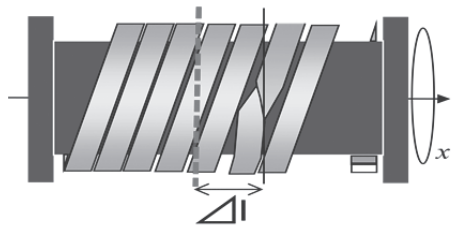


Fig.2 two-strand parallel conductor wound into a 1-layer solenoidal coil

$$-d_s \Delta \ell \frac{dB_e}{dt} - L d_s \mu_0 \frac{k}{w} \frac{dI}{dt} = 2V_C \frac{I^n}{I_C^n} + 4RI \quad (1)$$

k:幾何学的定数、L:導体長、 I_C :臨界電流値、 $V_C = 1.0 \times 10^{-4} [V]$

(1)式は解析解を求めることが困難なため、数値解析を行った。

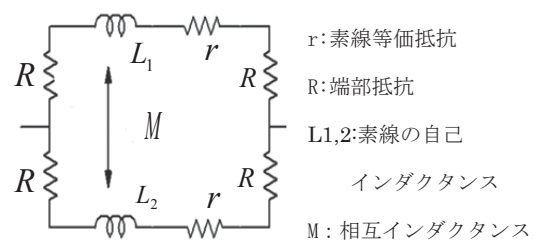


Fig.3 Equivalent circuit of a 2-strand parallel conductor

3. 考察

本研究では外部印加磁界を(2)式のように想定し、コイル軸方向に一樣とした。

$$B_e = \begin{cases} 0.1t & (0 < t \leq 30) \\ 3 & (30 \leq t) \end{cases} \quad (2)$$

Fig. 4 は $n=3,5,10,30,50, \infty$ のときの付加的交流損失の時間変化であり、 $n=\infty$ のときが臨界状態モデルに相当する。 n 値が小さいほど磁界増加時は付加的流損失が大きくなり、磁界一定時は早期の減衰が確認できた。また臨界状態モデルと比較すると、数倍から数百倍の差が見られた。今後は不均一磁場での付加的交流損失についても検討していく。

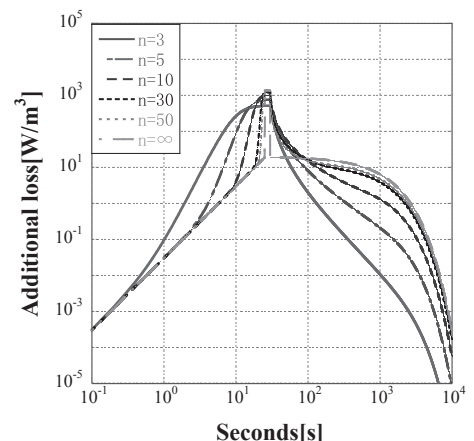


Fig.4 The property of the Additional AC loss

廃水処理への磁気分離の応用 ～酪農廃水中懸濁物質除去

Application of magnetic separation into wastewater treatment

～ removal of suspended solid in dairy wastewater

本間 司, 小野寺 利仁, 酒井 保藏 (宇都宮大学);

ミヒル ラル サハ (ダッカ大学); 高田 清信 (足尾化学工業(株)); 弓場 誠 (NEOMAX エンジニアリング(株))

HOMMA Tsukasa, ONODERA Toshihito, SAKAI Yasuzo (Utsunomiya Univ.);

MIHIR LAL Saha (Dhaka Univ.); TAKADA Kiyonobu (Ashio Chemical Co., Ltd.); YUNBA Makoto (NEOMAX eng Co., Ltd.)

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

1. はじめに

酪農廃水中には、SS(懸濁物質)が高濃度に含まれることがある。この SS は難生分解性のため、活性汚泥法のトラブルの主要原因になっている。この SS を十分に除去するには高分子凝集剤とろ過装置が必要で、農家の負担となっている。我々は安価な無機凝集剤とマグネタイトを用いて廃水中の SS を磁気シーディングし、磁気分離できることを見出した。本研究では、酪農廃水中の SS 除去に磁気分離を導入することを目的として、実際の牧場廃水を用いて、SSの磁気シーディング条件を調べ、磁気分離装置による分離性能を評価した。また、従来の高分子凝集剤とろ過装置を用いた方法と本プロセスとのコストについても比較、考察した。

2. 実験方法

(1) 磁気シーディングの条件検討 那須の A 牧場から実廃水をサンプリングし、5℃で保管し、これを実験に用いた。実廃水 100 ml をビーカーにとり、塩化鉄(III)を鉄として 100~300 mg/L 添加し、上澄みの透明度から最適添加量を求めた。この条件でさらに、マグネタイトを 500~2000 mg/L になるように加え、ネオジム磁石(表面磁束密度 = 0.3 T)で磁気分離した。分離水の SS と COD_{Cr} から、マグネタイトの最適添加量を求めた。

(2) 実廃水の磁気分離実験 用いた磁気分離装置(高磁力クーラントセパレーター-NCS-12, NEOMAX エンジニアリング(株)製)を Fig. 1 に示す。ドラム表面の最大磁束密度 0.5 T, 直径 165 mm, 幅 360 mm。この装置に、最適条件で磁気シーディングした実廃水を一定流量で流入し、分離水中の SS から性能を評価した。

3. 結果と考察

(1) 磁気シーディングの条件検討 塩化鉄は、代表的な無機凝集剤であり、水中で凝集フロックを形成し、廃水中の SS 成分とマグネタイトを一体化させる。まず、塩化鉄のみの廃水への最適添加量を求めたところ、添加量 500 mg/L の時は凝集が不十分であり、1000 mg/L の時は上澄みが透明になり、1500 mg/L の時は上澄みに着色が見られ過剰添加と考えられた。したがって、最適添加量を 1000 mg/L とした。

次に、塩化鉄の最適添加条件でマグネタイトの最適添加量を求めた。添加量 500 mg/L の時は磁気吸引力不足であったことから添加が不十分と考えられ、添加量 1000 mg/L 以上からは十分に磁気吸引されたことが観察できた。したがって 1000 mg/L が最適と判断した。このときの分離水の SS は 15 mg/L (除去率 99%), COD_{Cr} は 1380 mg/L (除去率 90%) であった。SS は一律排水基準 200 mg/L (日間平均 150 mg/L) を十分満たしている。一方、



Fig. 1 Apparatus of Magnetic Separation

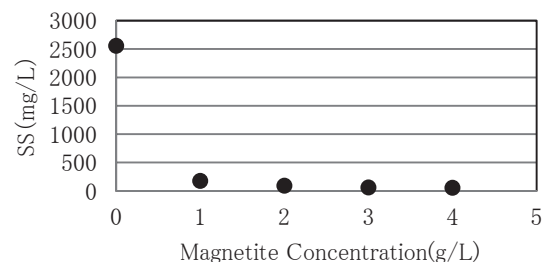


Fig. 2 Result of Magnetic Separation ~ Removal of SS

COD_{Cr} は BOD の一律排水基準を満たしていないと予想されることから、生物処理が必要である。

(2) 実廃水の磁気分離実験に関する考察 実際の牧場の流量 (5 m³/d), ドラムの回転数 2 rpm の条件の下、連続磁気分離装置で磁気分離を行った。分離水の SS 濃度を Fig. 2 に示した。(1) の実験結果で示した通り、マグネタイト濃度は 1000 mg/L あればよいことがわかった。このときの SS 除去率は 93% であった。

(3) コストに関する考察 磁気分離を導入した場合、マグネタイトは現在 100 円/kg で入手可能であり、排水量が 5 m³/d であることから 1000 mg/L で添加する場合は 15000 円/月、塩化鉄の添加コストは 1000 mg/L を添加した場合約 17000 円/月と見積もられた。高分子凝集剤とろ過装置を用いる場合、同等の分離水を得るためには塩化鉄とマグネタイトの添加コストと同等のコストが見積もられる。磁気分離装置のコストは現行の固液分離装置の半以下である。装置の電力も磁気分離装置の方が小さい。

4. まとめ

実廃水の磁気分離実験では塩化鉄を用いマグネタイトでシーディングすることで、93%以上の SS が除去できた。コストに関しては現行の方法と比べて同等もしくは安価になることが示された。

謝辞: 本研究は科研費基盤(A)24241021 の支援を受けた

抗生物質を含む廃棄乳の磁化活性汚泥による無害化処理

Treatment of Waste-Milk Containing Livestock Antibiotics by Magnetic Activated Sludge Process

山岸 峻也, 石田 勝優, 高 娃, 酒井 保藏 (宇都宮大学); 井原 一高 (神戸大学); Saha Mihir Lal (ダッカ大学)

YAMAGISHI Shunya, ISHIDA Katsumasa, Wa Gao, SAKAI Yasuzo (Utsunomiya Univ.)

IHARA Ikko (Kobe Univ.); Saha MIHIL LAL (Dhaka Univ.)

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

1. はじめに

酪農業に水処理設備が普及しつつある中で、廃棄乳の処理が問題となっている。代表的な家畜用抗生物質を含む模擬廃棄乳を用い、磁化活性汚泥法による無害化処理適用の可能性について検討した。その結果、磁気分離により実験期間中の余剰汚泥の引き抜きが不要となり、酪農家の運転管理の負担を軽減できることが示唆された。家畜用抗生物質が分解でき、COD_{Cr}も排出基準以下まで処理できることが示された。

磁化活性汚泥法は余剰汚泥削減、負荷変動に対する安定性、維持管理の容易さなどで従来の活性汚泥法に勝っている。近年、酪農業の排水管理の厳格化が法制化され、水処理設備が普及しつつある中で、廃棄乳の処理が問題となっている。廃棄乳は不定期に発生し、排水負荷を大きく変動させるだけでなく、含まれる抗生物質が環境中に放出され、耐性菌発生の原因となっている。磁化活性汚泥法は、余剰汚泥を引き抜かないため抗生物質を資化できる微生物が増殖し、抗生物質を生分解できることが期待できる。また、維持管理が容易なため、農家の運転管理の負担を軽減することも期待される。

本研究では代表的な家畜用抗生物質を含む模擬廃棄乳を用いて、磁化活性汚泥(Magnetic Activated Sludge:MAS)法による無害化処理の可能性について検討した。

2. 実験方法

模擬廃棄乳は牛乳を蒸留水で 50 倍に希釈し調製した。COD_{Cr}は約 4,500 mg/L であった。抗生物質の分解能試験は、実験開始 53 d から代表的な家畜用抗生物質であるテトラサイクリン(TC)を 10 mg/L になるように追加した。

実験装置は MAS 法と接触酸化法(Contact Oxidation:CO)の二段処理(1 L/d)とした。前段の MAS 法では、種汚泥として下水活性汚泥を用いた。これに MLVSS と同濃度になるようにマグネタイトを添加した。MAS 法の曝気槽は 5.0 L とした。後段の CO 法では、支持体として 1.0 cm 立方のスポンジの内外に微生物を自然増殖させた。CO 槽の容積は 2.5 L とした。

MLSS, MLVSS, COD_{Cr}, 濁度などについてそれぞれ測定した。TC の濃度は紫外部の吸光度より簡易的に測定した。

3. 結果と考察

一般に、微生物は 85%程度の有機成分と 15%程度の無機成分からなる。MLVSS は微生物の有機成分のみに相当することから、MLVSS×100/85 は微生物濃度に相当する。これを推定微生物濃度(E-Microbe)とし、経日変化を Fig. 1 に示した。E-Microbe は 100 d 以降に約 14,000 mg/L で安定した。200 d 以降に 17,000 mg/L に増加したのは、CO 槽の微生物を支持体から剥離させて MAS 槽に投入したことによる。投入された微生物は、MAS 槽内のマグネタイトにより磁気シーディングされるため、MAS 槽に保持された。微生物濃度は 17,000 mg/L でほぼ一定となった。これは汚泥の増殖と自己消化がバランスし

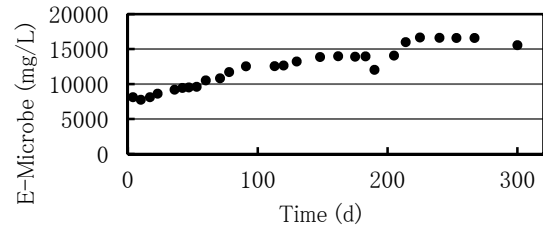


Fig. 1 Change of Estimated Microbial Concentration with Time

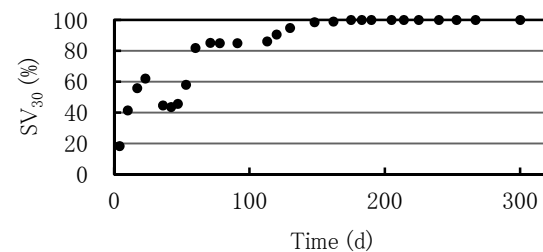


Fig. 2 Change of SV₃₀ with Time

たためと考えられる。Fig. 2 には MAS 槽の汚泥を取り出し 30 分沈降させた時の液全体に対する汚泥の沈降体積の割合、SV₃₀ の経日変化を示した。沈降分離では、30~40%以上で分離困難になるといわれる。したがって、10 d 以降は水処理の継続に磁気分離が欠かせないことがわかる。150 d 以降では汚泥はほとんど沈降しないが、磁気分離後の濁度は 30 NTU (微生物濃度に換算して約 25 mg/L) 以下を維持できた。除去率は 99%と見積もられた。磁気分離によって沈降分離できない高濃度汚泥の分離が可能となり、実験期間を通じて余剰汚泥の引き抜きなく運転を続けられた。

微生物を高濃度で保持することで、水処理能力の向上も期待された。COD_{Cr} 除去率について、MAS 法だけでも 97%以上の除去率を維持することができた。一律排出基準を十分達成できる結果となった。また TC の生物処理について、53 d の添加開始から 203 d まで TC の持つ 355 nm 付近の吸収ピークが MAS 法からの排水でほとんど観察されなかった。この間の TC 添加量が 2.0 g に達し、吸着では説明できないことから TC が分解されていると推察された。

4. まとめ

沈降分離が困難である高濃度汚泥を磁気分離により固液分離することで、余剰汚泥の引き抜きなく運転することが可能となった。運転管理が容易になったことで、酪農家の負担の軽減が示唆された。また、微生物を高濃度で保持できたことにより水処理能力の向上も期待され、抗生物質の生分解による無害化処理の可能性が示唆された。

謝辞: 本研究は科研費基盤(A)24241021 の支援を受けた。

食品排水処理のための高濃度磁化活性汚泥法における 磁気分離の課題とその対策

Investigation of Magnetic Separation of High Concentration Magnetic Activated Sludge process for Food Industrial Waste Water Treatment

小室 ゆい, 酒井 保藏(宇都宮大学); 花井 洋輔, 中田 栄寿(富士電機)

KOMURO Yui, SAKAI Yasuzo (Utsunomiya Univ.); HANAI Yosuke, NAKADA Eiju (Fuji Electric Co.,Ltd)

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

1. はじめに

磁化活性汚泥法は磁気分離を用いた水処理法である。標準活性汚泥法に比べ、高濃度の活性汚泥を速やかに固液分離することができるため、高濃度排水への対応が可能である。本実験では合成食品排水を使用し、ベンチスケールで高負荷実験を行った。標準活性汚泥法の上限での運転において、有機物除去は良好に行われた。その1.5倍の負荷では汚泥濃度が高くなり、用いた磁気分離装置の性能を向上させる必要があることが分かった。

食品排水における生物処理は、有機物濃度が高いため高負荷運転が求められているが、汚泥濃度が高くなるため沈降分離では固液分離トラブルを引き起こしやすく、デリケートな管理が必要となる。また余剰汚泥が大量に発生するため二次廃棄物処理も課題となっている。

磁化活性汚泥法(MAS法)は、水処理の主流となっている標準活性汚泥法の変法であり、汚泥に磁性粉(Fe_3O_4)を添加することで、磁気分離可能としたプロセスである。固液分離トラブルが起こらないため、高負荷運転が可能である。また槽内に高濃度で汚泥を保持し、増殖と自己消化をバランスさせることによって余剰汚泥ゼロエミッションが可能である。

本実験では、磁気分離を用いた、維持管理の簡単な新しい水処理法の実現を目指し、合成食品排水をベンチスケールに用いてその性能を評価することで可能性を検討した。

2. 実験

用いた実験装置を Fig. 1 に示す。下水汚泥を模擬排水で馴養し、5.0 L の曝気槽に MLVSS と磁性粉をそれぞれ約 10,000 mg/L になるように入れ、混合して磁化活性汚泥とした。窒素除去を行うため 30 分曝気/30 分曝気停止のサイクルで間欠曝気を行った。模擬排水は、ポリペプトン、グルコース、デンプンを主成分とし、 COD_{Cr} : 約 2000 mg/L になるよう調製したものを用いた。Run 1, Run 2 の容積負荷はそれぞれ 1 g/(L・d), 1.5 g/(L・d)とした。液温は 23~26°C であった。

MLSS, MLVSS, COD_{Cr} , COD_{Mn} , NH_4^+-N , NO_3^--N を JIS 法に基づいて測定した。T-C, T-N については島津 TOC 計を使用して測定した。

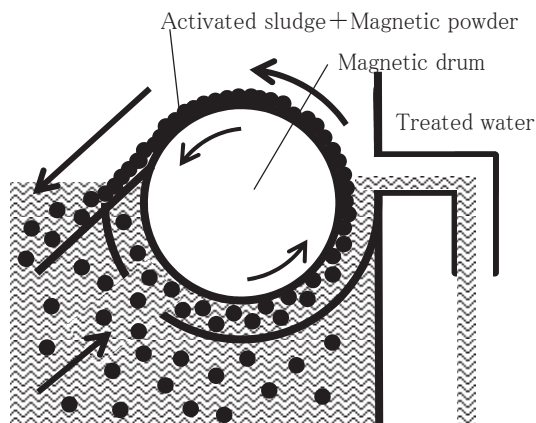


Fig. 1 Magnetic Separation Apparatus

3. 結果と考察

Fig. 2 に汚泥に含まれる微生物濃度(微生物中の MLVSS 成分が 85%と仮定して微生物濃度に換算した値)の経日変化を示す。Run 1 では、微生物濃度は約 14,000 mg/L で安定して推移した。この間、処理水への汚泥の流出はなく、引き抜きは不要であった。Run 2 では負荷の上昇とともに濃度が上昇した。34,000 mg/L に達すると、汚泥の破過が見られた。槽内の汚泥濃度が磁気ドラム上の汚泥濃度に近づくため、処理水を分離できなくなったと考えられる。

Fig. 3 に処理水の COD_{Cr} 濃度の経日変化を示す。14 日以降、除去率約 93% で推移し、有機物除去は良好に行われた。Run 2 の開始時、処理水質が悪化したが、磁気分離が原因ではなく、曝気量を上げたところ改善が認められた。

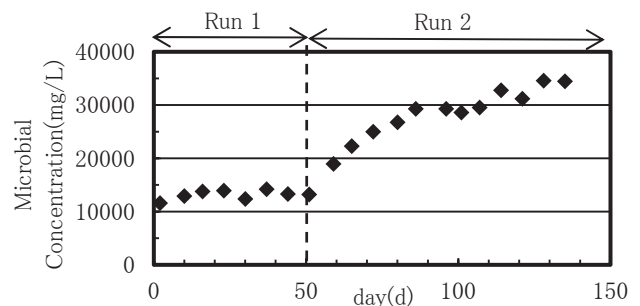


Fig. 2 Microbial Concentration

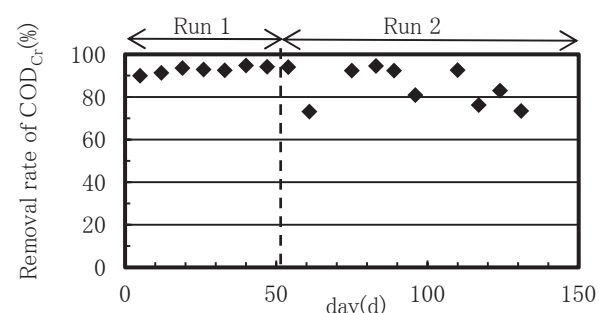


Fig. 3 Removal Rate of COD_{Cr}

4. おわりに

磁化活性汚泥法での高濃度排水の高負荷運転では、標準活性汚泥法の上限での運転において、汚泥引き抜きなしで、有機物除去は良好に行われた。しかし、その1.5倍の負荷では微生物濃度が30,000 mg/Lを超え、用いた磁気分離装置の性能を向上させる必要があることが分かった。