

# HTS-SQUID グラジオメータを用いた平打組物 CFRP の非破壊検査

## Nondestructive Inspection of flat braided CFRP using HTS-SQUID gradiometer

新山 陽平, 廿日出 好, 田中 三郎(豊橋技科大); 高井 由佳, Mohamed S.A.-Hassan, 仲井 朝美, 濱田 泰以(京都工芸繊維大)  
 SHINYAMA Y., HATSUKADE Y., TANAKA S. (TUT); TAKAI Y., S.A.-HASSAN Mohamed, NAKAI A., HAMADA H. (KIT)  
 E-mail: y083818@edu.imc.tut.ac.jp

### 1. 緒言

複合材料の一種である組物炭素繊維強化プラスチック (Braided Carbon Fiber Reinforced Plastics: 組物 CFRP) は比強度や比剛性が高く、形成した組物内の炭素繊維が連続しているため複雑な構造でも強度が高いという特性を持っている。京都工芸繊維大学の濱田教授らは組物 CFRP の製作及び力学的特性の評価等に取り組んでいるが[1]、材料特性に関してより多くの情報を得るためには外形や力学的特性を示す応力ひずみ線図やなどの巨視的情報だけでなく、繊維や繊維束の状態などの微視的情報も必要である。一方、我々はこれまでに高い感度と空間分解能を持つ磁気センサ HTS-SQUID を用いた電流注入法による材料の非破壊検査に関する研究を行ってきた[2]。この手法は、導電性である炭素繊維に電流を流し、サンプル内の電流密度分布に類似するサンプル上面の磁場勾配分布を SQUID グラジオメータで測定し、これらの分布から CFRP の強度を維持する炭素繊維の状態を評価する方法である。我々はこの手法を用いて、引張試験により引張負荷を与えられた組物 CFRP の繊維状態の評価を行った。この結果、組物 CFRP の破断の開始箇所の予測の可能性が得られたのでここに報告する。

### 2. 実験

Fig.1 に測定を行った平打組物 CFRP サンプルを示す。このサンプルは、25 本の炭素繊維の束を平打という技法で ±45° に組んだものをハンドレイアップ成形法によりエポキシ樹脂で平らに固めた板状の組物 CFRP である。サンプルは長さ 160 mm、幅 41 mm、厚さ 1 mm である。サンプルには引張試験のためアルミタブを両端の両面に接着してある。サンプルの左右両端に電極を取り付け、7mA@800Hz の電流を印加し、HTS-SQUID グラジオメータを用いた測定システムを用いてサンプルから 3 mm 離れた xy 平面上の磁場勾配  $dB_z/dy$  及び  $dB_z/dx$  を計測した[3]。まず、引張負荷を与えていない初期サンプルの磁場勾配分布を測定し、その後、インストロン万能試験機により 1mm/min の速度で引張負荷を与えてサンプルを破断させ、上記と同条件で磁場勾配分布を再計測した。サンプル上面の磁場勾配  $dB_z/dy$ 、 $dB_z/dx$  がサンプル内電流密度  $J_x$ 、 $J_y$  と類似することを利用して、測定した磁場勾配分布図から引張負荷を与える前後の組物 CFRP サンプルを評価した。

### 3. 実験結果

Fig.2 に引張試験前後の磁場勾配  $dB_z/dy$  分布を示す。サンプルには右方向に電流を流してあり、色が濃い部分は X 方向電流密度に類似する磁場勾配  $dB_z/dy$  が高いことを示している。測定の際、引張試験の前後共にサンプルには同じ大きさの電流を流した。また、磁場勾配の表示レンジをそろえてある。Fig.2(a) に引張負荷を与える前の健全なサンプルの結果を示す。このサンプルでは、全ての炭素繊維束間に同電圧が印加されているため、炭素繊維束にはほぼ均一に電流が流れたと考えられる。したがって、磁場勾配の高い箇所は電流密度が高く、これは炭素繊維の密度が高いことを、磁場勾配の低い箇所は電流密度が低く、炭素繊維の密度が低いことを示している。Fig.2(a) では、磁場勾配は上下両端を除きおよそ均一になっているが、その中で破線 A で示した箇所に周囲より磁場勾配がわずかに低いラインが繊維束の組角度 45° に沿って現れた。このことから、破線 A のラインは炭素繊維の密度が低いと推測される。また、この磁場勾配が低いライン A 上でも、

点線で囲った範囲 B は磁場勾配が少し高かった。Fig.2(a) 測定後に引張試験を行った結果、上記の破線 A 上に断裂が生じた。Fig.2(b) に引張試験後のサンプルの磁場勾配測定結果を示す。Fig.2(a) の破線 A の位置に対応する断裂が発生した破線 C の下側では磁場勾配が減少し、電流がほとんど流れていないことがわかる。一方、破線 C の上側では磁場勾配が増加しており、電流のほとんどがサンプル上部を流れていることがわかる。このことから、断裂部楕円 D では右下 45° 方向の炭素繊維が断裂しており、電流は炭素繊維束が断裂せず繋がっている破線 C の上部を流れたと推定できる。また、破線 C 上の楕円 E は試験前の磁場勾配の高い楕円 B と対応しており、炭素繊維密度が高く強度が高かったため破断せず、断裂の終点となったと考えられる。これらの結果から、CFRP の強度を維持する炭素繊維の密度が高い箇所は断裂しにくく、密度が低い箇所が断裂しやすいと考えられる。このことから、炭素繊維の密度が強度に影響する可能性があり、HTS-SQUID グラジオメータによる組物 CFRP の評価によって破断開始箇所を予測できる可能性を示した。

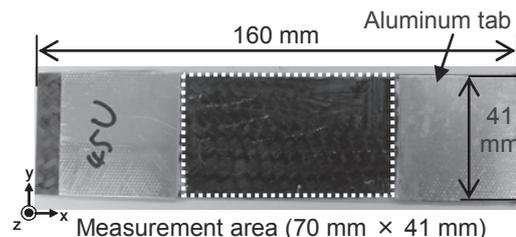


Fig.1 Flat braided CFRP sample before loading

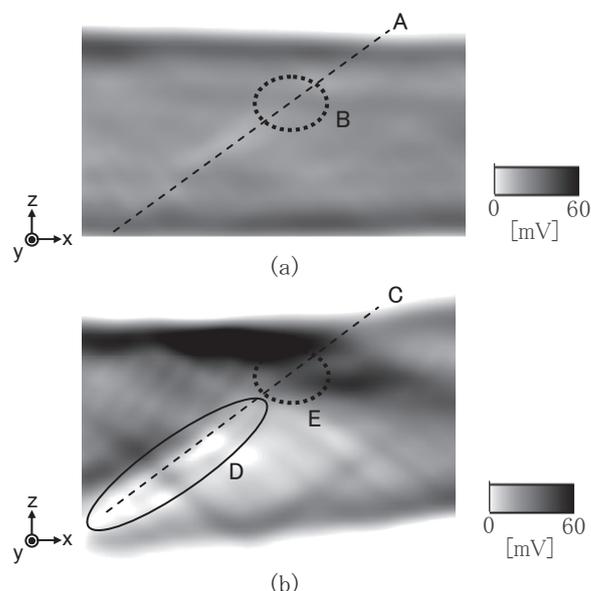


Fig.2 Experimental results.

(a)  $dB_z/dy$  before breaking. (b)  $dB_z/dy$  after breaking.

### 参考文献

- [1] H. Hamada, et al.: J. Thermoplast. Compos. Mater. 12 (1999) p.164
- [2] Y. Hatsukade, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. 13 (2003) p.207
- [3] Y. Shinyama, et al.: Adv. Mat. Res. 123-125 (2010) pp.835

# HTS-SQUID グラジオメータを用いた 8 チャンネル磁性金属異物検出装置

## 8-Channel Magnetic Metallic Contaminant Detector Using HTS-SQUID Gradiometers

北村 善洋, 黒澤 龍一, 廿日出 好, 田中 三郎(豊橋技科大); 大谷 剛義, 鈴木 周一(AFT)  
 KITAMURA Yoshihiro, KUROSAWA Ryuichi, HATSUKADE Yoshihimi, TANAKA Suburo(TUT);  
 OHTANI Takayoshi, SUZUKI Syuichi(AFT)  
 E-mail: y083813@edu.imc.tut.ac.jp

### 1. はじめに

近年、リチウムイオン電極箔などの工業製品において、生産ラインから剥落した鉄やステンレスなどの微小な磁性金属異物の混入が製品の機能異常を引き起こすことが明らかとなっている。そのため、製造工程では異物検査が不可欠であり、現在、50 $\mu\text{m}$ 未満のサイズの磁性異物の検出が可能な装置が求められている。そこで、我々は高感度かつ、高時間分解能を持つ HTS-SQUID を用いた異物検出装置の開発を行ってきた[1]。これらの装置では、製品を磁石で磁化し、含まれる磁性異物の残留磁化を検出する方式を用いるが、磁性材料を含む電極箔の場合、電極箔自体が磁化をもつため混入した磁性異物の磁化と重畳し、異物検出は困難となる。このため、本研究では微小な異物による局所的磁場変化を検出できる SQUID グラジオメータを採用した。さらに、幅を有する製品の全体検査に対応できるようにグラジオメータを 8 個設置した異物検査装置を開発した。本装置の性能評価について報告する。

### 2. 8 チャンネル型磁性金属異物検出装置

本研究では、HTS-SQUID グラジオメータを用いて 8 チャンネル磁性金属異物検出装置の試作を行った。このシステムの構成図を Fig.1 に示す。帯磁用ベルトコンベアを囲むように設置した永久磁石に製品を通過させることで製品中に存在する磁性金属異物を帯磁させる。この永久磁石は水平方向に製品サンプルを帯磁する。永久磁石によってベルトコンベア全体が帯磁しないように分離して設置した。サンプル移動用ベルトコンベア。2層パーマロイ磁気シールドの中に SQUID を搭載した顕微鏡型クライオスタットが設置されており、14 時間液体窒素温度を保持することができる。先端には、ベルトコンベアの全幅をカバーするよう 8 個の SQUID グラジオメータが入れ子のよう 2 次元配列で設置されている。製品サンプル中の帯磁した異物から発生する残留磁化を SQUID によって測定し異物を検出する。製品の磁化が一樣な場合、製品両端のみに残留磁化が現れるため、製品の中央付近では製品の残留磁化の影響が少ない異物信号が得られる。

### 3. 異物検出実験と測定可能範囲

開発した 8 チャンネル磁性金属異物検出装置を使用して、異物サンプルの測定を行った。今回の実験の異物サンプルは  $\phi 95\mu\text{m}$  の鋼球 (S50C) を使用した。その結果、Fig.2 の 1.8s あたりに見られる異物信号が約 14 の S/N で得られた。またこの異物サンプルを使用して、試作した装置のベルトコンベア幅 100mm 内の計測可能範囲を調べた。本実験では、配線の不具合により 8 個の SQUID 素子の内 3 つの素子を使用することができなかった。そのため、残りの 5 個の素子でサンプルの位置を移動させて測定を行った。結果を Fig.3 に示す。図中点線で示されているグラフは各チャンネルで得られた値の平均値からプロットしたものである。Fig.2 に示すノイズ ( $1.5\text{m}\phi_0$ ) から S/N3 を検出可能と仮定して閾値を  $4.5\text{m}\phi_0$  と設定すると、この装置は約 75mm の範囲を通過する  $\phi 95\mu\text{m}$  の鋼球を検出できることが分かった。素子と素子間の信号強度は、異物が SQUID 素子の直下を通過した時よりも低く

なっているが、例えば 2 つの素子の信号出力を足し合わせることで十分測定可能なレベルであると考えられる。

### 4. まとめ

8ch 異物検出装置を試作し評価を行った。異物検出実験を行い  $\phi 95\mu\text{m}$  の鋼球を検出した。また、装置の測定可能範囲を明らかにした。今後はさらに小さな  $\phi 50\mu\text{m}$  異物検出を可能にするため、サンプルと SQUID 間の距離の低減や磁石の磁場強度の増大を行っていく予定である。

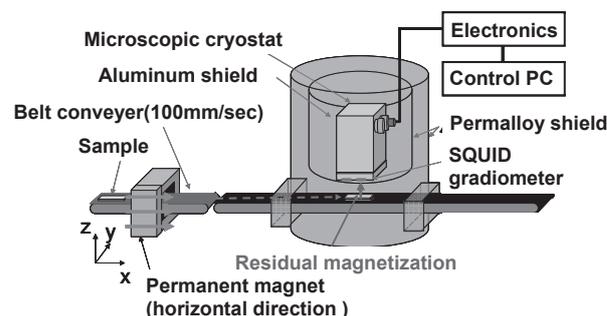


Fig.1 Schematic diagram of system

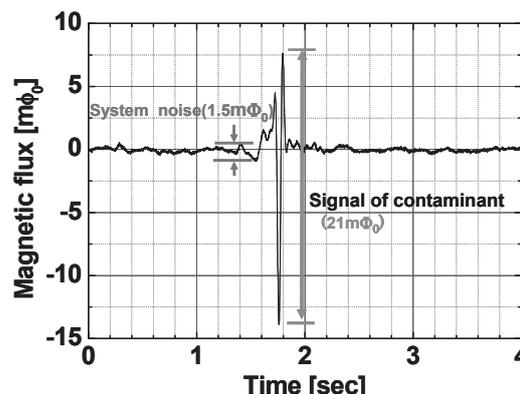


Fig.2 Signal of steel ball of  $95\mu\text{m}$  in diameter

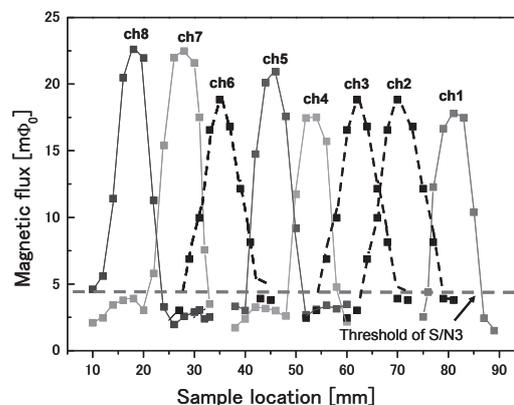


Fig.3 Detectable area of the system

### 参考文献

[1] T. Akai, et al.. IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol. 45 (2009) p. 4510.

# HTS 薄膜を積層したバイクリスタル接合型 HTS rf-SQUID に関する研究

## HTS rf-SQUID with Bicrystal Josephson Junction Covered by HTS Thin Films

黒澤 龍一, 北村 善洋, 竹本 真, 廿日出 好, 田中 三郎(豊橋技科大)

KUROSAWA Ryuichi, KITAMURA Yoshihiro, TAKEMOTO Makoto, HATSUKADE Yoshimi, TAKANA Saburo(TUT),  
E-mail: r093813@edu.imc.tut.ac.jp

### 1. はじめに

我々は、超高感度磁気センサ HTS rf-SQUID を工業製品に含まれる微小な磁性金属異物の検査装置に応用してきた。本装置では、SQUID の高感度特性により、これまでに直径 30  $\mu\text{m}$  の鉄系磁性金属異物を検出できる可能性を示してきた[1]。この異物検査装置では、本研究室で開発したバイクリスタル SrTiO<sub>3</sub> (STO) 基板の上に YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub> (YBCO) で形成した、一体型 HTS rf-SQUID マグネトメータを用いてきた。本素子の磁場ノイズ特性と概略図を Fig.1 に示す。SQUID を用いた異物検査では、磁石で磁化した磁性異物をコンベアで約 100mm/s の速度で SQUID の下を移動させ、異物の残留磁化を信号として検出する。このため、ベルトコンベアのスピードに対応した 10 Hz 付近に異物からの信号が現れる。しかし、Fig.1 に示すように、本 SQUID はバイクリスタル STO 基板に形成したため、素子の右側に広い弱結合部を有する。このため、この帯域では、弱結合部での磁束トラップ・ジャンプが原因と考えられる 1/f ノイズが支配的となり、高感度検査の妨げとなっていた。そこで、HTS 薄膜の持つ磁場遮蔽効果に着目し、SQUID の弱結合部に別の HTS 薄膜を積層することで、弱結合部分に捕捉される磁束を減少させ、1/f ノイズを抑制できると考え、HTS 薄膜の積層について検討した。

### 2. 実験

本研究のため開発した SQUID 素子は、バイクリスタル STO 基板の上に YBCO 薄膜を成膜し、外径 9×9 mm<sup>2</sup> のワッシャー型 rf-SQUID を形成したものである。SQUID のホール形状は 50×800  $\mu\text{m}^2$  の矩形であり、素子感度は 430 fT/Hz<sup>1/2</sup>@10 Hz、155 fT/Hz<sup>1/2</sup>@100 Hz である。Fig.1 に示すように 100 Hz 以下で 1/f ノイズが現れている。この 1/f ノイズの低減を試みるため、本研究室では、Fig.2 左上の挿入図のように一体型 rf-SQUID の広い弱結合部分(粒界)に、厚さ 0.25  $\mu\text{m}$  のバイクリスタルでない STO 基板に形成した HTS 薄膜を、フリップチップ方式で SQUID 上に貼り合わせ、粒界部における磁気遮蔽を試みた。また、一体型 rf-SQUID において、信号磁束を検出する際、スリットから漏れ磁束が発生することにより、有効捕獲面積  $A_{\text{eff}}$  が減少しているのではないかと考えた。そこで、スリット部を HTS 薄膜で覆うことで、 $A_{\text{eff}}$  が増加するかどうかを調べた。ここでは、Fig.2 右上の挿入図に示すように、一体型 HTS rf-SQUID の広い粒界部、もしくはスリット部に HTS 薄膜を積層したときの素子の特性について、磁気シールドルーム内に測定を行った。

### 3. 結果

Fig.2 と Table 1 に実験で得られたデータを示す。Fig.2 の①はシールドを施していない SQUID のノイズ特性、②は粒界部のみ、③はスリット部のみ、④は粒界部とスリット部両方に薄膜を施した場合のノイズ特性である。②に着目すると、ホワイトノイズレベルは①より少し大きい、1/f ノイズを大幅に減少させることに成功した。このときの磁場ノイズは 183 fT/Hz<sup>1/2</sup>@10 Hz、150 fT/Hz<sup>1/2</sup>@100 Hz であった。また、③では 1/f ノイズも低減しており、さらに、有効捕獲面積  $A_{\text{eff}}$  は①の 0.81 mm<sup>2</sup> から 0.92 mm<sup>2</sup> になり、約 10% 拡大できることがわかった。有効捕獲面積は④の粒界部とスリット部両方に施した場合が最も大きかったが、1/f ノイズは②粒界部のみの場合が最も抑制できた。

②では、最も磁束トラップ・ジャンプが生じやすいと考えられる粒界部を HTS 薄膜で覆うことで、1/f ノイズが減少したと考えられる。一方、④のように粒界部とスリット部両方を HTS 薄膜で覆うと、漏れ磁束を減らすことができ、有効捕獲面積を増加させることができたが、中央の穴に磁束が集中してトラップが生じたため、1/f ノイズはあまり減少しなかったと考えられる。

### 参考文献

1. M Takemoto, et al., "HTS rf-SQUID Microscope for Metallic Contaminant Detection", ASC2010, 3EP3F-03, 2010.

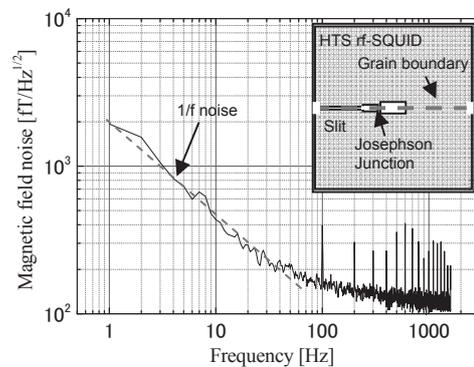


Fig. 1 Magnetic field noise of integrated HTS rf-SQUID on bicrystal STO substrate

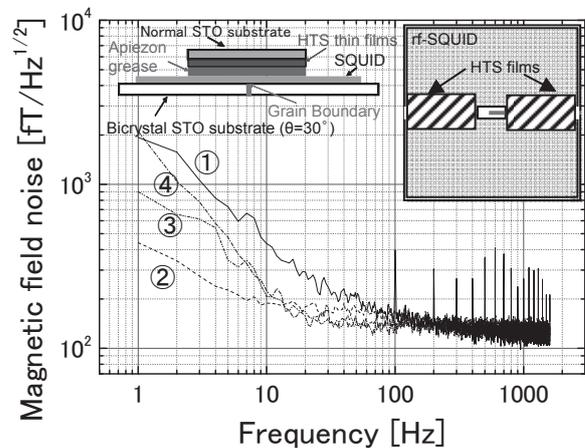


Fig. 2 Noise profiles of HTS rf-SQUID with and without HTS thin films

Table 1. Characteristics of HTS rf-SQUID with and without HTS thin films

HTS film	Without film	On GB	On slit	On GB & slit
$S_B^{1/2}$ @ 10Hz [fT/Hz <sup>1/2</sup> ]	440	190	210	225
$S_B^{1/2}$ @ 100Hz [fT/Hz <sup>1/2</sup> ]	240	170	140	135
$A_{\text{eff}}$ [mm <sup>2</sup> ]	0.81	0.83	0.917	0.931

# 磁場に対する HTS dc-SQUID の臨界電流変化の抑制に関する研究

## Suppression of change of critical current of HTS dc-SQUID in magnetic field

廿日出好, 小林 義幸, 黒澤 龍一, 田中 三郎 (豊橋技科大)

HATSUKADE Y., KOBAYASHI Y., KUROSAWA R., TANAKA S. (TUT)

E-mail: hatukade@ens.tut.ac.jp

### 1. 緒言

我々は、HTS-SQUID を用いた先進構造物のための非破壊検査技術を開発してきた[1]。これまでに、厚さ 6mm の積層構造水素燃料タンクを検査対象とし、タンク内部まで侵入する低周波数励磁と、低周波数でも高感度で、環境磁気雑音をキャンセルできる HTS-SQUID グラジオメータを組み合わせた 3 次元移動可能な非破壊検査装置を開発してきた。本技術の実用化に際しては、さらに厚い構造物の内部欠陥検出が要求されるため、地磁気を含む環境磁気中で冷却・移動させても安定して動作する HTS-SQUID マグネトメータの開発が必要と考えられる。

現在、一般的に用いられている HTS dc-SQUID マグネトメータでは、バイクリスタル SrTiO<sub>3</sub> (STO) 基板上に形成・パターンニングした YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub> (YBCO) 薄膜が用いられている。これを磁気シールドのない環境で 3 次元的に移動させる場合、約 40μT の強度をもつ地磁気の不均一分布ため、SQUID のジョセフソン接合の臨界電流  $I_c$  が変化し、SQUID 駆動用 Flux Locked Loop (FLL) 回路のロックを保つことが困難である。そこで、本研究では、HTS dc-SQUID マグネトメータに別の基板上的 YBCO 薄膜をフリップチップ形式で積層することにより、SQUID の  $I_c$  変化を抑制できることを明らかにしたので、その研究内容、実験結果について報告する。

### 2. 実験

今回、HTS dc-SQUID マグネトメータとして、Fig.1 に示すような、4 個のピックアップループが中央の dc-SQUID リングと直接結合したマグネトメータを設計・作製した。本素子の作製では、30° バイクリスタル STO 基板上に厚さ 200nm の YBCO を蒸着した。Fig.1 の左下の挿入図に示すように、SQUID リングは幅 5μm の矩形で、このような幅の YBCO 薄膜は約 50μT の静磁場中で冷却した際、磁束トラップが生じないことがわかっている[2]。本素子の SQUID リングの二つのジョセフソン接合において、静磁場を印加したときに接合の臨界電流  $I_c$  が変化することを抑制するため、Fig.1 の右側に示すような十字形状の YBCO 薄膜を、粒界を持たない STO 基板上に蒸着して、フリップチップ形式で SQUID マグネトメータに積層した。積層した十字型 YBCO 薄膜の位置は、Fig.1 に点線で示している。このように、接合を有する SQUID リングと、マイスナー効果により磁束密度が高いと考えられるピックアップループ間隙間をカバーするように薄膜を配置した。後者のカバーにより、冷却時にピックアップループ端にトラップされると予想される磁束が、積層薄膜により排除されることを期待した。一方、冷却時に積層薄膜自体が磁束をトラップすることが予想されたため、積層薄膜として、Fig.1 の右下の挿入図に示すようなメッシュを全体に設けた十字薄膜も用意した。以上の素子を、遮蔽率約 60dB の磁気シールドルーム内にて液体窒素で冷却し、十字薄膜、およびメッシュ入り十字薄膜を積層した場合における、静磁場印加時の SQUID の  $I_c$  の変化について計測を行った。

### 3. 実験結果

実験結果を Fig.2 に示す。ここでは、まず、十字型薄膜を積層しない場合の印加磁場と SQUID の  $I_c$  の関係を調べた。その結果、Fig.2 に示すように印加磁場の増加に従い  $I_c$  は減少し、約 250μT に最初の最小値をもつフラウンホーファーパターンを示した。一方、十字 YBCO 薄膜を積層した場合、メッシュのあり無しにかかわらず、静磁場強度が約 170μT に達するまで  $I_c$  の変化は抑制され、その後、薄膜なしと同様なパターン

を示した。これらの結果より、YBCO 薄膜の積層により、SQUID の  $I_c$  変化は地磁気レベルの静磁場分布中であれば抑制可能であることが示された。実際に、十字型薄膜を積層した SQUID を、約 40μT の地磁気を切るように通常環境中で一回転させたところ、SQUID の  $I_c$  は変化せず一定値であった。

一方、十字薄膜とメッシュ入り薄膜を積層した際の SQUID の磁束ノイズを計測したところ、Fig.3 に示すように、メッシュ入り薄膜を積層した場合、積層薄膜への磁束トラップが抑制され、1/f ノイズの増加が抑制されることがわかった。

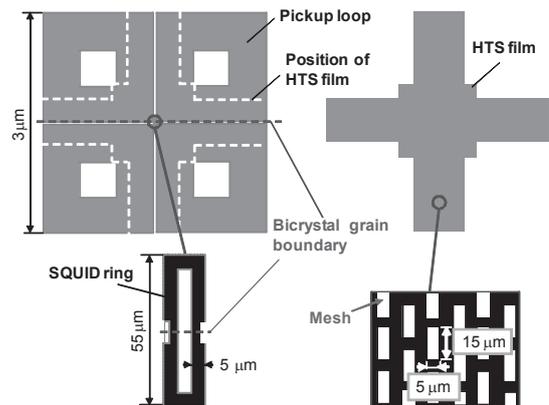


Fig.1 HTS dc-SQUID magnetometer (upper-left) and cross-shaped HTS film with meshes (upper-right)

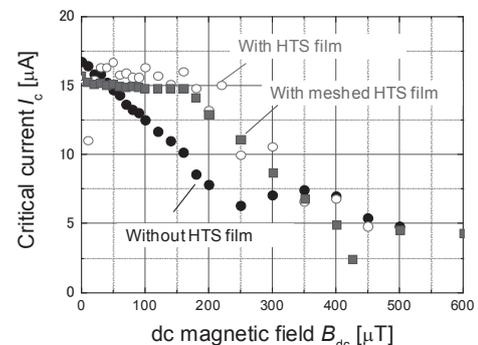


Fig.2 Critical current  $I_c$  vs. applied dc magnetic field  $B_{dc}$ .

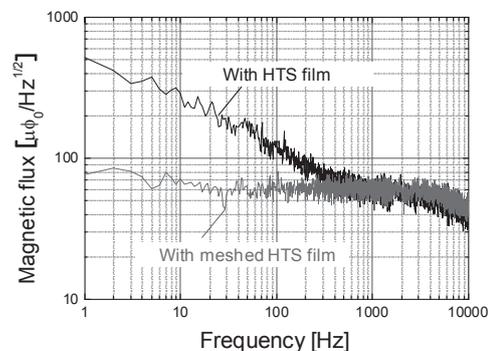


Fig.3 Noise of SQUID with HTS film and meshed HTS film.

### 参考文献

- [1] 廿日出好他, 2009 年度春季低温工学・超電導学会 概要講演集, p.131, 2009 年.
- [2] E. Dantsker, et al, Appl. Phys. Lett. **69** (1996) 4099.

# ダイレクトカップル型 HTS dc-SQUID マグネトメータの 有限要素解析の精度検討

## Accuracy investigation on finite element analysis of directly coupled HTS dc-SQUID magnetometer

寺内 直也, 野口 聡, 五十嵐 一 (北大); 廿日出 好, 田中 三郎(豊橋技科大)  
 TERAUCHI Naoya, NOGUCHI So, IGARASHI Hajime (Hokkaido University);  
 HATSUKADE Yoshimi, TANAKA Saburo (Toyohashi University for Technology)  
 E-mail: terauchi@em-si.eng.hokudai.ac.jp

### 1. はじめに

SQUID マグネトメータの磁界耐性を向上させる手法として、超電導薄膜シールドを取り付けてセンサ部を保護する方法がすでに提案されている[1]。超電導薄膜シールドは、マイスナー効果によって SQUID マグネトメータに鎖交する磁気ノイズを排除し、磁界耐性やノイズ耐性を向上させることが期待できる。超電導薄膜シールドを取り付けることで、SQUID センサの磁界耐性が向上することはすでに実験によって検証されている[1]。

本研究では、3次元有限要素法を用いて解析を行い、超電導薄膜シールドの効果を検証している。これまでに、四面体要素を用いた解析では、超電導薄膜シールドによって磁界耐性が向上することが確認できている[2]。しかしながら、四面体要素を用いた解析では解析精度などに問題が存在していることが知られている。そこで、新たに六面体要素を用いて解析を行った。

### 2. 解析手法

本研究では、解析手法として3次元有限要素法を用いている。本解析で解くべき支配方程式は次の(1)、(2)式で表される。

$$\text{rot}(\nu \text{rot} \mathbf{A}) = \mathbf{J}_0 + \mathbf{J}_{\text{sc}} \quad (1)$$

$$\text{div}(\mathbf{J}_0 + \mathbf{J}_{\text{sc}}) = 0 \quad (2)$$

ここで $\nu$ は磁気抵抗率、 $\mathbf{A}$ は磁気ベクトルポテンシャル、 $\mathbf{J}_0$ はSQUID マグネトメータのバイアス電流密度、 $\mathbf{J}_{\text{sc}}$ は超電導遮断電流密度である。解析中では、 $\mathbf{J}_{\text{sc}}$ は(3)式で考慮されている。

$$\mathbf{J}_{\text{sc}} = [\sigma_{\text{sc}}] \mathbf{E}_{\text{sc}} = [\sigma_{\text{sc}}] \left( \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \text{grad} \phi \right) \quad (3)$$

ここで、 $\sigma_{\text{sc}}$ は仮想導電率、 $\mathbf{E}_{\text{sc}}$ は超電導電流を発生させる電界で、 $\phi$ は電気スカラーポテンシャルである。

超電導体の特性を表現するためにE-J特性を考慮した仮想導電率を用いている[2]。仮想導電率は異方性を持ち(4)、(5)式で表される。

$$\sigma_{\text{sc},x}, \sigma_{\text{sc},y} = \frac{J_c}{|E|} \left( \frac{|E|}{E_c} \right)^{1/n} \quad (4)$$

$$\sigma_{\text{sc},z} = \text{constant} = 1.0 \times 10^{-10} \quad (5)$$

ここで、 $\sigma_{\text{sc},x,y,z}$ は仮想導電率のx,y,z方向成分である。この値を用いることで超電導体のE-J特性と異方性を考慮した解析を行っている。

### 3. 解析モデル

本解析では、超電導薄膜シールド付 SQUID マグネトメータとその周囲の空気領域を含む解析モデルを作成し、有限要素解析を行っている。解析モデルの外形図を Fig. 1 に示す。この図では、超電導薄膜シールドを取り付けた場合となっているが、超電導薄膜シールドを取り付けていない場合の解析も行うことで、シールド効果の検証を行っている。解析領域は、空気領域を含めて15mm × 15mm × 7.5mmを取っている。

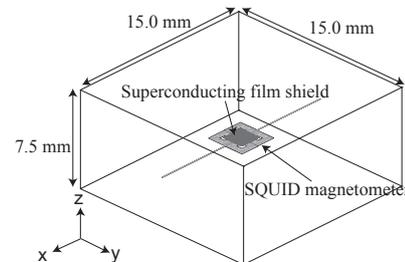


Fig. 1. Analysis model.

### 4. メッシュ分割と問題点

有限要素法を用いて解析を行うために、解析モデルをメッシュと呼ばれる要素に分割する必要がある。これまでの解析では四面体要素を用いて解析を行っていた[2]。しかしながら、扁平な四面体要素を用いると、その周辺で精度の良い解析が行えないことが知られている。四面体要素を用いた SQUID 解析では、超電導薄膜シールドと SQUID リング間の空気およびその周辺に扁平要素が多数存在し、数値解析に大きな解析誤差を与えている可能性が考えられる。Fig. 2 に四面体要素を用いた場合の SQUID リングを貫く磁束量の時間変化を示す。図中には、超電導薄膜シールドと SQUID リングとの間隔を 50 $\mu\text{m}$ 、30 $\mu\text{m}$ 、20 $\mu\text{m}$  と変更した場合の解析結果と超電導薄膜シールドがない場合の解析結果を示す。

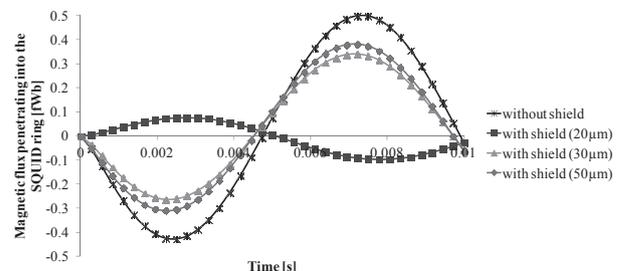


Fig. 2. Time transition of the magnetic flux penetrating into the SQUID ring (Tetrahedral mesh).

間隔を狭めていくと鎖交磁束量が減少しており、シールド効果が確認できる。しかしながら、間隔を 20 $\mu\text{m}$  とした解析では磁束量の時間変化が逆相となっており、前述した扁平要素の影響があったものと考えられる。そのため、この解析結果には精度的な問題が存在する可能性がある。

この問題を解決するために、近似精度が良いとされる六面体要素を用いて解析を行った。この解析結果から超電導体内部における電流の挙動をより高精度に求めることが期待できる。本発表では、四面体要素を用いた場合と六面体を用いた場合の解析結果を比較し、解析精度の面から要素の形状についての検討を行う。

### 参考文献

1. Y Hatsukade, et al., Supercond. Sci. Technol. 22, (2009), 114010
2. N. Terauchi, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 83 (2010) p.103

# 極低温での光ファイバ温度センサの感度向上

## Improvement of the sensitivity for temperature of optical fiber sensor at cryogenic temperature

山田 秀之、小方 正文、水野 克俊、長嶋 賢(鉄道総研); 奥村 昌平、寺田 佳弘(フジクラ)  
 YAMADA Hideyuki, OGATA Masafumi, MIZUNO Katsutoshi, NAGASHIMA Ken (RTRI);  
 OKUMURA Shouhei, TERADA Yoshihiro (Fujikura Ltd.)  
 E-mail: hiyamada@rtri.or.jp

### 1. はじめに

高温超電導線材を用いた磁石が実用化されつつあり、冷凍機による冷却で 20~77K 程度の温度にして使用することが可能である。しかし、液体ヘリウム、液体窒素等の冷媒を用いる浸漬冷却の場合は冷却対象の温度を冷媒の沸点に保つことができるが、冷凍機による冷却では全体を均一な温度に保つことが難しく、一部で温度異常が発生するのを早期に検知する必要がある。超電導磁石の内部温度を分布的に測定する方法として、1本のセンサで多点測定が可能で熱侵入量が少なく、電気絶縁性が高いというメリットを持つ光ファイバ温度センサを使用した。その極低温での特性を確認した結果、極低温での感度を向上する必要があることがわかったため、感度を向上するための方策を検討し、その方策の効果を試験により確認した。

### 2. 感度向上方法検討

従来の光ファイバ温度センサの極低温での特性を確認した結果、50K 程度以下では変化量が非常に小さいことがわかった。変化量が小さいと温度に対する感度が悪くなり、測定精度が低下する。そのため、極低温での感度が向上する方法について検討を行った。

光ファイバ温度センサは FBG(Fiber Bragg Grating)方式と呼ばれるタイプを使用しており、温度センサ部である FBG 部の温度変化による被覆材(UV 樹脂)の熱伸縮によって FBG 部で反射した光の波長が変化する。従来の光ファイバ温度センサでは、温度が低下するにつれて被覆材の熱膨張率が小さくなるために極低温で出力の変化量が小さくなった。よって、感度を向上する方法として熱膨張率の大きい材料を FBG 部にコーティングすることにした。また、ヤング率が大きい材料ほどコーティングした際の複合材の見かけの熱膨張率が大きくなるため、ヤング率の大きい材料もコーティングすることにした。

熱膨張率もしくはヤング率の大きい材料をいくつか選定し、測定値を計算により予測した結果、感度向上が見込まれるアクリル樹脂とニッケルを選択した。それぞれの材料を単独でコーティングした光ファイバ温度センサを製作して確認試験を実施したが、後で述べるように、アクリル樹脂をコーティングしたセンサでは感度が向上し、ニッケルをコーティングしたセンサでは安定した結果が得られたため、両方の材料による二重コーティングしたセンサも製作して確認試験を実施した。

### 3. 試験方法・結果

Fig. 1 に試験装置の概要図を示す。2 種類の材料を単独もしくは二重にコーティングした FBG 部を 5 つ有した光ファイバ温度センサを冷却容器内に設置し、また、比較として、セルノックス温度センサを同じ箇所に設置した。室温から 10K 程度まで冷却した後、冷凍機を停止して自然放置により室温まで昇温、これを 2 回実施した。

Fig. 2 に測定した結果を示す。グラフはセンサ出力の温度依存性を示している。なお、FBG 部を 5 箇所設置したが、そのうちの 1 箇所の結果を示している。アクリル樹脂のみをコーテ

ィングした場合は、従来のセンサより感度が 2 倍程度に向上したが、部分的に不安定さが残った。ニッケルのみをコーティングした場合は、感度は向上しなかったが、安定性は向上した。二重コーティングした場合は、感度向上と安定性の両方の効果を併せ持った結果が得られ、ニッケルコーティングのみの場合より 1.3 倍程度に感度が向上した。

### 4. 考察・まとめ

光ファイバ温度センサの極低温での適用のために、FBG 方式タイプについて、極低温での感度低下に対する向上方法を検討した結果、前述の成果が得られた。

アクリル樹脂コーティングの測定結果で、部分的に不安定であるのは、熱伝導率が低いことと、自由な熱伸縮が摩擦により妨げられたためと考えられる。また、ニッケル及び二重コーティングの測定結果は、熱伝導率がアクリル樹脂より高いことから、安定していると考えられる。ただし、二重コーティングの測定結果は、ヤング率が大きいニッケルに律速されるため、感度の大きな向上はなかった。

今後、FBG 部の固定方法及び極低温の感度がさらに向上して、かつ、安定した結果の得られる方法を検討する。

本研究の一部は国土交通省の補助金を受けて実施した。

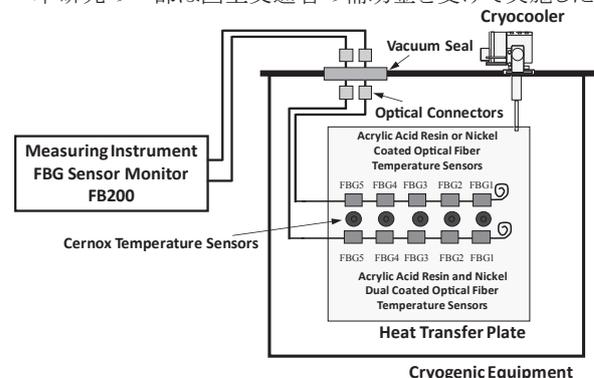


Fig.1 Schematic Illustration of Experimental Equipment

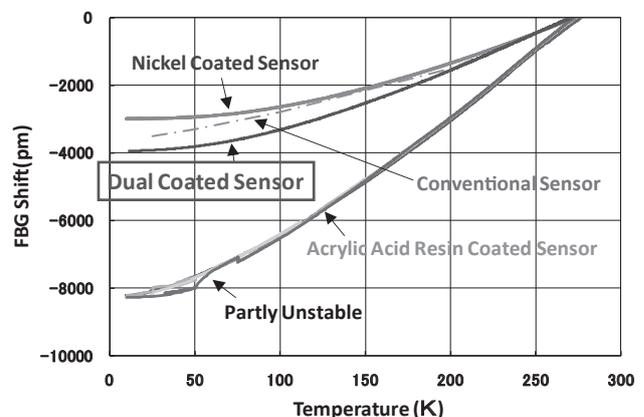


Fig.2 Experimental Result, Temperature Dependence of the FBG Wavelength Shift

# 振子除振した pulse 管予冷希釈冷凍機と高感度捻り振子法による振動評価

## Pendrum vibration isolated pulse tube refrigerator pre-cooled Dilution refrigerator and in situ vibration measurements using torsional oscillator technique

宮 利雄(東大); 齋藤 康太(新潟大); 久保田 実(東大)

MIYA Toshio(ISSP,U-Tokyo); SAITO Kota (NIIGATA-U); KUBOTA Minoru(ISSP,U-Tokyo)

E-mail: miya@issp.u-tokyo.ac.jp/kubota@issp.u-tokyo.ac.jp

### 1. はじめに

超流動現象は、その電子の超流動である超伝導の発見から 100 年を経て、今や液体 He や金属中の電子に限らず、希薄気体のボーズ凝縮(BEC)状態、更には固体 He や絶縁体中の電子の系で迄見られる様になっている。我々は高感度捻り振子(torsional oscillator, TO)実験によって、固体 He の固体超流動状態[1]及びその量子渦液体状態[2]を研究し、また一方で、パラジウム中水素系等金属水素系で見られる、原子状水素に起因する量子多体現象を探索している[3]。固体ヘリウムの TO 実験では固体超流動及びその量子渦液体状態は、著しく微小な振動に敏感であること[1,2]、パラジウム水素系の実験[3]では、系の時定数が長い事等で微小振動により測定値がノイズに埋もれてしまう可能性がある。従ってこれらの系の研究には大変長時間連続した低温での振動のない状態での実験が必要である。前低温工学超伝導学会で紹介した pulse 管冷凍機で予冷する希釈冷凍機を組み込んだ冷凍機[4]での更なる低温除振とその計測の取り組みを紹介する。

### 2. 希釈冷凍機温度での除振

我々は無振動状態で超低温を得るため、冷凍機の建設を行なっている。この冷凍機の特徴は、1 に述べた条件を満たすため、次の様に纏める事が出来る。

1. 長時間連続運転を可能とする為、Pulse 管冷凍機予冷の希釈冷凍機を基本の構成としている。
2. 希釈冷凍機部で少なくとも Submicron meter/sec 程度迄振動による直線速度を落とす事。
3. 上記を実現するため天井から吊り下げられている振子状の除振機構で、真空中の 0.7K 以下の低温部が直接支えられている事。
4. この除振機構を機能させる為に機械的自由度を持った熱接触法等を試している。

前回学会では室温での除振性能を示した[4]。今回、自作希釈冷凍機の試験的設置とそれに伴った真空ライン、ポンプ、バルブの取り付けを行った。また熱接触も工夫している。

### 3. 希釈冷凍機の取り付けと全体構造

本冷凍機は、地上設置のフレームに固定された 30mm 厚 AL 板と、それに直付けされた SuS 製 300K フランジ、そこから断熱パイプで固定された 50K 及び 4 K 銅フランジ部分がある。4K フランジ以下は独立な真空容器になって居る。その中へ天井から吊られている Cu パイプ中に、矢張り天井より吊るした 3本の撚線ワイヤに繋がれた 0.7K フランジ以下希釈冷凍機部がある様に構成されている。

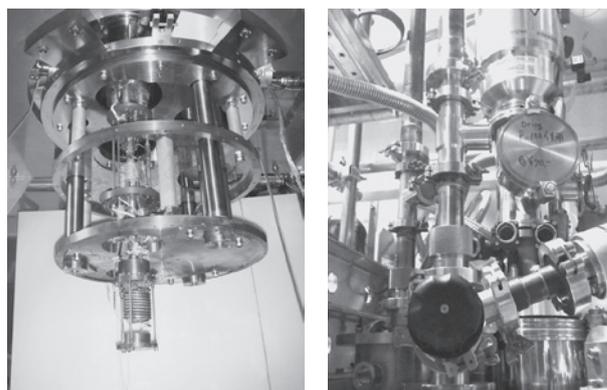
300K フランジと 4K フランジにはそれぞれ vacuum can が付き、独立に真空ラインが接続される。これは内側となる測定空間を独立に高真空にするため、または内側の vacuum can 内部へ熱交換ガスを封入して内部の予冷を効率的にする為である。

今回、vacuum can の真空ライン用ターボポンプとバルブを、また、JT 予冷の自作希釈冷凍機を取り付け、それに伴い、ヘリウム 3 循環用のターボポンプと大きな流量を確保するためにコンダクタンスの大きいバタフライバルブを取り付けた。

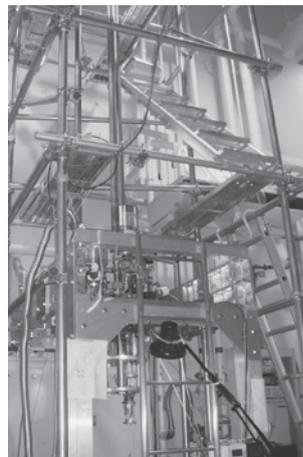
振動を伝えることなく、かつ熱流入が少なくなるようにリード線や同軸ケーブルの取り出し口や、取り付けにも改良も工夫したい。

### 4. 振動評価

振動評価は TO を用いて行っており、真空低温でさらに感度が上昇することがわかっており、今回の取り組みにより、さらに除振の効果を明確に示すことができると期待している。



(a). 自作JT予冷希釈冷凍機部 (b). 300K Topフランジ上:  
(a)は0.7K plate以下を外した状態。(b)ではStill排気用ターボポンプ等が天井から吊ってある真空配管の間に見える。



(c). 全体写真: 3本の銅パイプが天井から吊り下がり、その中を除振用の撚り線が走っている。床から天井の吊り位置まで約 7m。

### 謝辞

JT予冷希釈冷凍機部を製作した五十嵐武に感謝します。

### 参考文献

1. N. Shimizu, Y. Yasuta, M. Kubota: ArXiv:0903.1326 (2009); M. Kubota, N. Shimizu, Y. Yasuta, A. Kitamura, M. Yagi: J Low Temp Phys 162, 483-491 (2011).
2. A. Penzev, Y. Yasuta, M. Kubota: Phys Rev Lett 101, 065301 (2008).
3. S. Harada, T. Donuma, H. Araki, T. Tomoda, R. Nakatsuji, R.M. Mueller, M. Kubota, J Low Temp Phys (2011) 162: 724-732.
4. 宮 他, 第83回 2010年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集 p109

## Vibrating Reed 法による水素拡散状態の観察2

## State observation of hydrogen scattering by vibrating reed method 2

重松 利信(佐世保高専);小野 文慈(佐賀大);河江 達也(九大工);橋爪 健一(九大総理工)

SHIGEMATSU Toshinobu (Sasebo National College of Tech.);

ONO Bunji(Saga Univ.); KAWAE Tatsuya(Kyushu Univ.); HASHIZUME Kenichi(Kyushu Univ.)

E-mail: shige@post.cc.sasebo.ac.jp

## 1. はじめに

我々はこれまで金属中の水素の挙動を観測する目的で Vibrating Reed 法による実験装置の開発を進めてきており、金属の共振周波数の温度依存の測定結果 (Fig.1 参照) や、水素を含んだ金属の共振周波数の温度依存の first data を報告した<sup>2)</sup>。

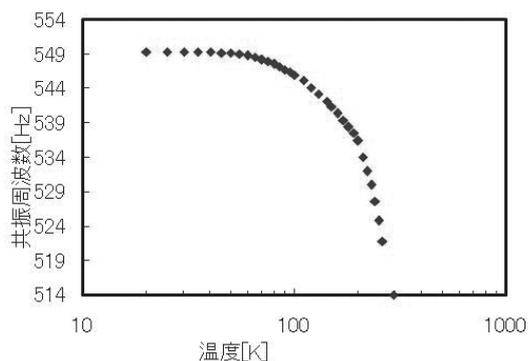


Fig.1 Temperature dependence of resonance frequency of Aluminum sample.

ところで、金属内の水素の拡散現象は室温付近では熱拡散が主であるが、窒素温度以下ではトンネル効果による拡散が主となり、その拡散速度も室温で 0.1mm/h と比較的速いことが知られている<sup>1)</sup>。

そこで、その装置の水素の存在有無による感度を調べる目的で、室温で水素拡散中の金属薄板の共振周波数の変化及びQ値の変化を測定した。

## 2. 実験装置

Vibrating Reed法を用いた測定回路系統図をFig.2 に示す。室温の発振器からの信号が低温部の実験セル部の電極に伝えられ、サンプルは次式に従う力で引かれる。

$$F = \frac{1}{2} \epsilon_0 \left( \frac{V}{\ell} \right)^2 S$$

ここで、Vは電圧、Sは電極面積、 $\ell$ は電極-サンプル間距離である。その振動を室温に設置したレーザドップラ干涉計でピックアップする。ところで、実験セルは蒸着装置を改良した

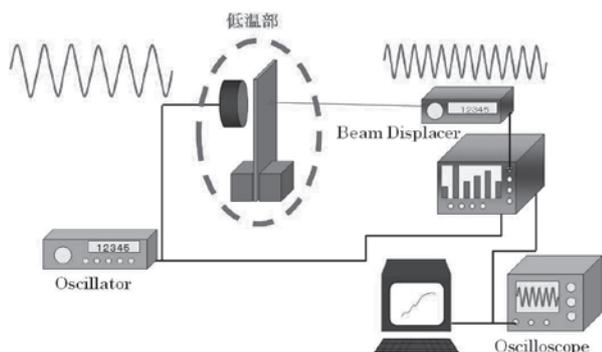


Fig.2 Schematic setup of vibrating reed and block diagram for measurements

恒温槽のチャンバー内で水素雰囲気を作って実験を行っている。その際、レーザドップラ干涉計はチャンバー外に設置し、ガラス窓を通して測定できるようにした。

## 3. 測定結果

試料はSUS304 を使い、あらかじめ 100MPa の水素雰囲気に 25 時間さらしたもの 50MPa の水素雰囲気に 25 時間さらしたものの 2 種類について、共振周波数とQ値の時間変化を測定した。水素の抜けていく様子を十分に変化量を測定できている。

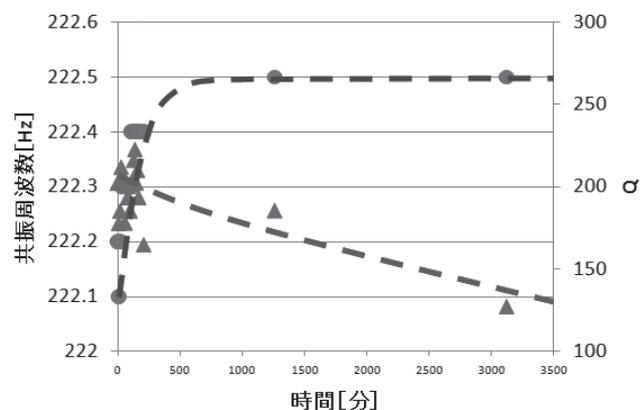


Fig.3 Time dependences of resonance frequency and Q-value at room temperature. 50MPa hydrogen atmosphere.

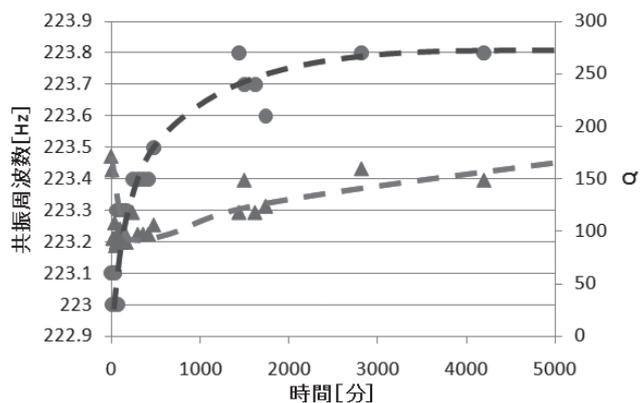


Fig.4 Time dependences of frequency and Q-value at room temperature. 100MPa hydrogen atmosphere.

## 参考文献

1. 水素と金属, 深井有・田中一英・内田裕久著, 内田老鶴園 p.123 (1993)
2. T.Shigematsu et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 81 (2009) p.229

## 寒剤中の放電特性

～液体ヘリウム中でのカーボンナノチューブの生成実験の予備実験～

### DISCHARGING CHARACTERISTIC IN CRYOGEN

～Exploratory experiment of Carbon nanotubes generation experiment in liquid helium～

重松 利信, 川崎 仁晴(佐世保高専), 今坂公宣(九州産業大学), 河江達也(九大工)  
 SHIGEMATSU Toshinobu, KAWASAKI Hitoharu (SASEBO National College of Tech.),  
 IMASAKA Kiminobu (Kyushu Sangyo Univ.) and KAWAE Tatsuya (Kyushu Univ.)  
 E-mail: shige@post.cc.sasebo.ac.jp

#### 1. はじめに

1991年の飯島のカーボンナノチューブの発見以来、生成法に関する研究は盛んに行われている。その中で液中放電法による生成法ではカーボンオニオンなど新構造体の発見があった<sup>1)</sup>。特に液体窒素中放電生成法では、高品位な多層カーボンナノチューブの生成の報告されている<sup>2)</sup>。

そこで、我々は更なる新構造体の探索と生成機構の解明の糸口を目指して、液体ヘリウム中での生成法を試みている。これまでに Fig.1 に示す多層のカーボンナノチューブの生成に成功した<sup>3)</sup>。ところが、その生成は非常に不安定で、同じ放電条件で実験しても、生成に成功したりしなかったりする。そこで、液体ヘリウムや液体窒素中では放電特性に違いがあるのではないかと考え、系統的な放電特性の観測実験を行っている。

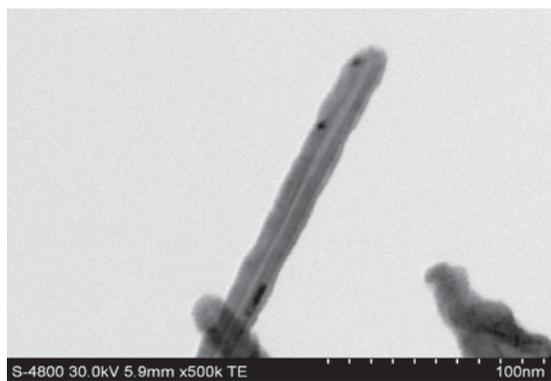


Fig.1 TEM images of the nano-material products using contact arc experiment in liquid helium. Though its inside diameter is 2 ~ 4nm, its outside diameter is approximately 20nm. Unfortunately, it is not possible to find out how many walls these clusters have because of the low sensitivity of TEM imaging. This shows that it has multi-walls.

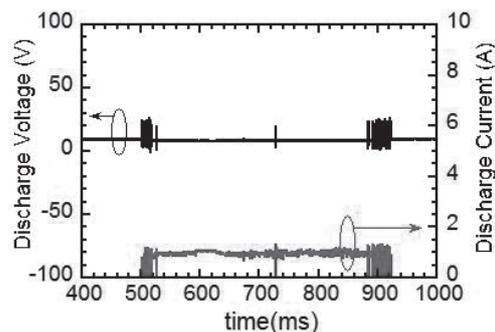
#### 2. 実験装置

実験セルの冷却および実験空間の確保にはガラスデュワーを用い、実験セルは液体ヘリウムに浸漬して使用する。セル部の概略図を Fig.1 に示す。アーク放電を行わせる電極は両極ともφ10のカーボンロッド(99.99%)を用い、放電しやすいように先端は鋭利にしている。下部電極は固定されており、上部電極は可動式である。実験では上部カーボン電極を上下させ、下部電極との放電特性を観測する。

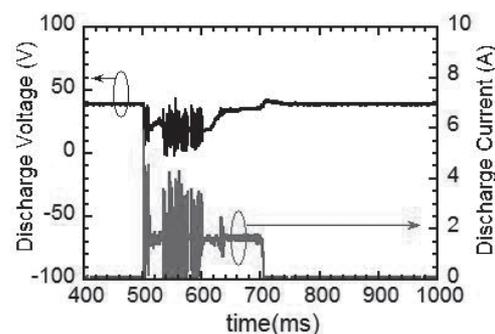
#### 3. 実験結果

Fig 2 に液体ヘリウム中放電時の電圧、電流変化を示している。それぞれの最大放電電圧は上から 10V, 40V, 80V である。それぞれの放電時に流れる平均電流は 0.5~2A と非常に小さい結果であったことから、放電電流はインピーダンスによって決まっているようである。また、図

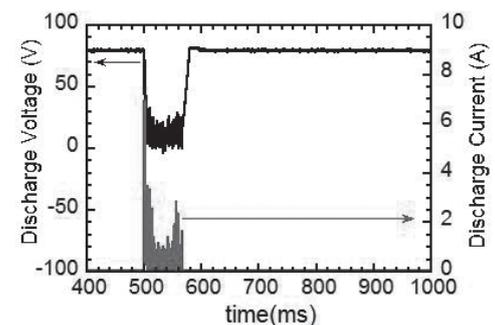
中に見られる激しい揺れは電極間に形成されたバブルによるものではないかと思われる。



(a) 10V, 80A



(b) 40V, 40A



(c) 80V, 10A

Fig. 2 Discharge current and voltage characteristic of this discharge in liquid helium as parameters of discharge voltage.

#### 参考文献

1. N.Sano, H.Wang et al., Nature, **414**, (2001) p.506
2. M.Ishigami, J.Cummings et al., Chem, Phys. Lett., **319**, (2000) p.457
3. T. Shigematsu, H. Kawasaki, Y. Johno, T. Ohshima, Y. Yagyuu, W. M. Guan and Y. Suda, J. Plasma Fusion Res. SERIES, Vol. 8, p599 (2009).

## 新しい蓄冷材充填方法を用いた GM 冷凍機の特 Characteristics of the GM cryocooler using new regenerator material filling method

増山 新二, 田村 昂大(大島商船高専); 沼澤 健則(NIMS)  
MASUYAMA Shinji, TAMURA Kota (Oshima National College); NUMAZAWA Takenori (NIMS)  
E-mail: masuyama@oshima-k.ac.jp

### 1. はじめに

われわれは、GM 冷凍機の 2 段目蓄冷材の低温側に  $Gd_2O_2S$ (以下、GOS とする)を適量充填することで、4K レベルでの冷凍能力向上に大きく寄与できることを実証してきた[1,2]。ここで、2 段目蓄冷材は高温側から Pb,  $HoCu_2$ , GOS 球が三層に充填され、GOS の最適割合は、蓄冷器体積全体の 20~30%を占める必要があることを見出している。しかしながら、GOS が冷凍能力向上に寄与できる温度領域が 4~6K 程度と限られていた。そこで本研究では、この欠点を補うために、新しい蓄冷材充填方法を考案し、特性試験を行った。以下に、充填方法の概略と試験結果を述べる。

### 2. 新しい蓄冷材充填方法「同軸配置」

従来、異種の蓄冷材を充填する場合には、図 1 に示すように、蓄冷材の比熱特性が有効に利用できるよう「層配置(layer layout)」する方法が用いられている。この構造では、蓄冷器内を流れるすべてのヘリウムガスと、すべての蓄冷材とが、蓄冷器長さ方向において熱交換を行う。したがって、熱負荷により、いずれかの蓄冷材が、大きな比熱を有している温度領域から外れてしまうと、その部分で熱容量が不足し、大幅な性能低下を招く。特に、低温側に充填される GOS の比熱特性は 5K 付近で鋭いピークを持っているため、Pb,  $HoCu_2$  の二層構造と比較すると、7K 以上の温度領域において冷凍能力が大きく低下していた[1,2]。

そこで今回は、新しい蓄冷材充填方法として、蓄冷材を「同軸配置(coaxial layout)」する方式を考案した。概略図を図 2 に示す。蓄冷器(内径:15mm $\Phi$ , 長さ:100mm)の高温側に Pb, 低温側の外側に  $HoCu_2$ , 内側に GOS を充填させた。同軸構造とすることで、ヘリウムガスは内側と外側に分流する。したがって、4K 付近では GOS の熱容量を使い、高温領域では  $HoCu_2$  の熱容量を利用することができる。なお、 $HoCu_2$  と GOS を仕切るために、内径 9mm $\Phi$ , 長さ 50mm, 肉厚 0.5mm のステンレス管を使用した。その管内に GOS が充填されている。このステンレス管による熱伝導損失は、数 mW 程度であると見積もられている。ただし、管低温端温度を 4K, 管高温端温度を対数平均温度差から 14K として計算した値であるが、実際の温度差は、より小さいと考えている。また、仕切り用パイプは、蓄冷器損失低減の観点から、熱伝導率の低い材質で肉厚の極力薄い物が必要である。

### 3. 実験方法・結果

2 段 GM 冷凍機(SHI:SRDK-101D, 電気入力:1.3kW@60Hz)を使用し、その 2 段目蓄冷材を図 2 に示す同軸構造として冷却試験を行った。今回は、Pb 球を高温側から 50%充填し、残りの 50%を同軸構造とした。実験した蓄冷器タイプと充填した蓄冷材重量を表 1 に示す。ここで、Layer1 は二層構造、Layer2, 3 は三層構造、Coaxial は同軸構造を示す。球径は Pb,  $HoCu_2$ , GOS, それぞれ 0.2, 0.2, 0.25mm $\Phi$  である。

図 3 に 4 つの蓄冷器タイプにおける冷凍能力試験結果を示す。低温側に GOS を層充填した Layer2, 3 においては、Layer1 と比較して 4K 付近での冷凍能力が大きくなっているものの、7K 以上では冷凍能力が大幅に低下している。これは、GOS の比熱特性と密接に関係していることが容易に理解できる。一方で、同軸構造を用いた Coaxial では、10K 程度まで、

Layer1 とほぼ同等な冷凍能力が得られている。さらに、Layer2, 3 で大幅な低下が見られた 7K 以上においても、それらと比較して約 30%の能力改善が見られている。

### 4. まとめ

新しい蓄冷材充填方法として、蓄冷材を「同軸配置」することを提案し実験を行った。この方式はヘリウムガスが内側と外側に二分して流れるため、同軸配置された二つの蓄冷材の特性を活用することができる。冷凍能力試験結果からも、本方式の有効性を実証することができた。

さらに、本方式を採用することで、球形やメッシュ構造に加工することが困難である微粒子なども蓄冷材として利用できると考えている。

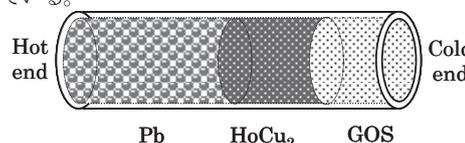


Fig.1. Three-layer layout of regenerator materials

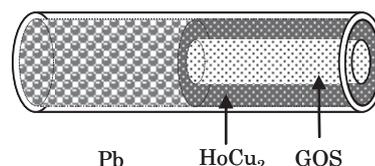


Fig.2. Coaxial layout of regenerator materials

Table1. Regenerator type and filling weight

Regenerator Type	Filling weight [g]		
	Pb	$HoCu_2$	$Gd_2O_2S$
Layer 1	59	52	0
Layer 2	59	32	10
Layer 3	59	18	20
Coaxial	59	32	10

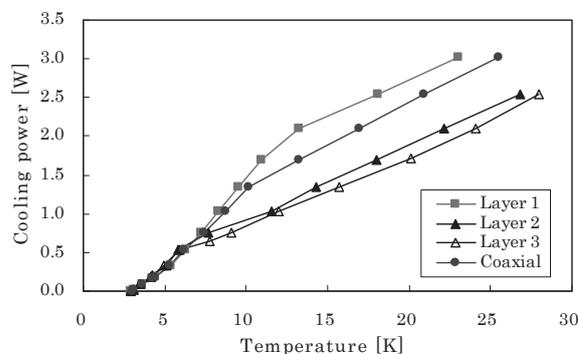


Fig.3. Cooling power comparison for four regenerators

### 【参考文献】

1. S. Masuyama, et al.: Cryogenics to be published
2. K. Tamura, Y. Fukuda, S. Masuyama and T. Numazawa: Abstracts of CSJ conference Vol.83 (2010) p.105

# ハルバツハ配列を用いた室温磁気冷凍機的设计と製作

## Design and Fabrication of Room-temperature Magnetic Refrigerator

### Applying Halbach-array Magnetic Circuit

脇 耕一郎, 荒井 有気, 水野 克俊, 長嶋 賢(鉄道総研);  
伊藤 孝治(蔵王精機); 宮岡 優, 川南 剛(神戸大)

WAKI Koichiro, ARAI Yuuki, MIZUNO Katsutoshi, NAGASHIMA Ken (RTRI);  
ITO Koji (ZAHOUSEIKI); MIYAOKA Yu, KAWANAMI Tsuyoshi (Kobe University)  
E-mail: waki@rtri.or.jp

#### 1. はじめに

鉄道車両の冷房機の COP(Coefficient of Performance: 成績係数)は, 車両に搭載する際の制約条件のために, 家庭用のそれに比べて低いものになっている。車両の運用に関わる省エネルギーを図るため, 現行の気体冷凍に代わる冷房技術として, 室温磁気冷凍の研究を進めている。

磁気冷凍は, 磁気熱量効果(ある種の強磁性体である磁気作業物質の励磁・消磁に伴う発熱・吸熱の作用)を応用するものである。室温領域の磁気冷凍には, AMR(Active Magnetic Regenerator: 能動型磁気的熱量再生器)を用いた冷凍サイクルが採用されている[1]。

磁気作業物質に対して強い磁場を効率的に作用させる設計を行い, 円環状ハルバツハ配列の磁気回路の対と, その回転による励消磁という方式を採用した。そして, 前回の円環状ハルバツハ配列の磁気回路など[2]に続き, 回転駆動機構や冷媒循環機構などを用意し, これらを組み立てて室温磁気冷凍機を製作したので報告する。

#### 2. 室温磁気冷凍機の製作

回転駆動機構は, 円環状ハルバツハ配列の磁気回路の対を回転させることにより, 磁気作業物質に対して励消磁を行って磁気熱量効果を発現させるために用意した。また, 冷媒循環機構は, 媒体を流動させることによって磁気作業物質に対して熱交換を行い, 発現した磁気熱量効果を外部に引き出すために用意した。尚, 冷媒循環機構には, 媒体を流動させるポンプや, 高温端部の温度を維持するチラーなどが含まれる。磁気作業物質として, 752g のガドリニウムを充填層に収納した。これらの組み立てによって室温磁気冷凍機を製作した(Fig.1 参照)。充填層表面における最大磁束密度は 1.1 T となった。

#### 3. 冷凍能力測定

製作した室温磁気冷凍機の冷凍能力の測定を行った。パラメーターは, 回転駆動機構の回転数と冷媒循環機構の流量である。冷凍能力は, 高温端部をチラーによって一定温度(20°C)に維持し, 低温端部へ予め設置したヒーターの熱平衡に達した際の入力とした。まずは, 冷凍機の高温端部と低温端部の温度差をゼロとして, 冷凍能力が最大となる条件を調査した。Fig.2 に測定結果の例を示す。この例では, 流量の増大と共に冷凍能力が増加している。

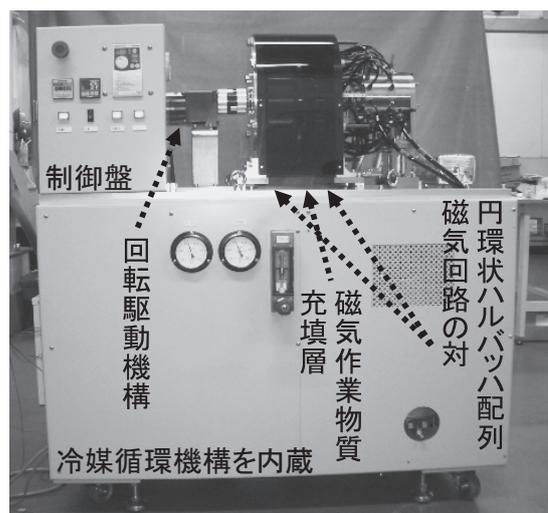


Fig.1 Assembled room-temperature magnetic refrigerator with rotating Halbach-array magnetic circuit rings

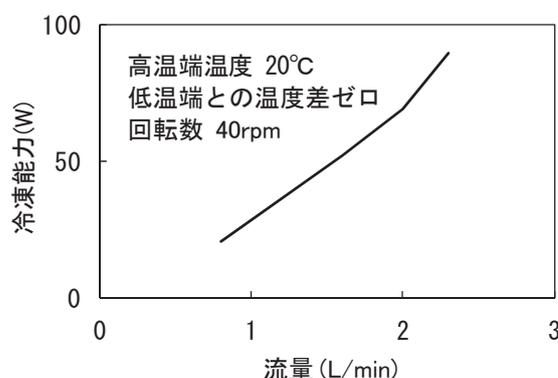


Fig.2 Experimental result of the room-temperature magnetic refrigerator

#### 4. おわりに

測定と並行して構築した熱解析モデルにより, 流量が増加すると冷凍能力は更に増加するという予測を得ている。これを確認するため, 改造によって流量を増加させる予定である。

#### 参考文献

1. M. Saimaru, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 78 (2008) p.211
2. K. Waki, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 82 (2010) p.99

# 一次元モデルによる室温磁気冷凍の冷凍性能解析

## Numerical analysis of magnetic refrigeration at room temperature

門間 大輔, 坂本 浩嵩, 太田 匡則, 中込 秀樹(千葉大); 八木 亮介, 小林 忠彦, 加治 詩織, 富松 師浩, 齋藤 明子(東芝)  
 MONMA Daisuke, SAKAMOTO Hiroataka, OTA Masanori, NAKAGOME Hideki (Chiba University);  
 YAGI Ryosuke, KOBAYASHI Tadahiko, TOMIMATSU Norihiro, KAJI Siori, SAITO T. Akiko (Toshiba)  
 E-mail: mon\_mon\_monma@yahoo.co.jp

### 1. はじめに

室温磁気冷凍技術は環境負荷の小さい未来の冷凍技術として期待が寄せられている。これまでの研究により、永久磁石を用いた AMR(能動的蓄冷型磁気冷凍)方式により、室温付近から零下の温度生成を達成している[1]。

一方、磁気冷凍技術の実用化には熱出力の向上が必要不可欠である。そこで本研究は熱出力の向上に向けて冷凍性能を明らかにするため、AMR bed 内部での熱の移動と外部への吸放熱をモデル化し、AMR サイクル条件が熱出力に及ぼす影響について、実際の試験装置(Fig.1)を模擬した一次元モデルによる数値実験で検討した。

### 2. 計算モデル

数値実験では、AMR bed 内に充填される冷媒と磁性体間の熱移動と、冷媒と放熱部(Hot end)および吸熱部(Cold end)間の外部熱移動を考慮した。Fig.2 に、冷媒と磁性体のエネルギー保存式を示す。上が冷媒についてのエネルギー保存式、下が磁性体についてのエネルギー保存式である。試験装置の AMR bed を熱流方向に複数セルに分割し、各々のセルにおいて、エネルギー保存式の関係が成り立つようにした。磁性体の磁場印加・除去に伴う発熱・吸熱は、磁性体のエントロピー変化と比熱の温度依存性を考慮した。AMR サイクルにおける冷媒移動時間、距離については、実験と対応が取れる条件にて模擬した。

### 3. 数値実験結果

#### 3-1 内部での熱の移動

Fig.3 に典型的な AMR サイクルの運転に伴う高温端と低温端の温度変化の様子を模擬的に示した。ここで AMR 内部での熱出力(温度上昇速度)を見積もるため、高温端と低温端の温度差  $\Delta T$  が 15K になるまでの温度変化の上昇勾配(時間微分値)を、熱出力の評価値とした。数値実験によって求めた内部熱出力のサイクル周波数依存を、実験と比較した結果を Fig.4 に示す。実験において内部熱出力が周波数の増加に伴って増大してゆく様子が数値実験でもほぼ模擬できた。数値実験において、さらに周波数を増加させてゆくと、0.6Hz 以上では熱出力は減少し、ピークもつことが示唆された。

#### 3-2 外部への吸熱、放熱

外部への熱出力を考慮するにあたり、高温端、低温端部からの放熱量を変化させ、それに伴う外部への熱出力と、高温端、低温端部間の温度差  $\Delta T$  を調べた。この結果、外部への放熱量を上げていくと外部熱出力( $Q_c$ ,  $Q_h$ )は大きくなり、やがて飽和することが確認された。また、 $\Delta T$  と  $Q_c$ ,  $Q_h$  はトレードオフの関係にあることが示された。結果の詳細、また考察については講演にて報告する。

本研究の一部は、(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務として行われたものです。

#### 参考文献

1 . T. Kobayashi, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 77 (2007) p. 138

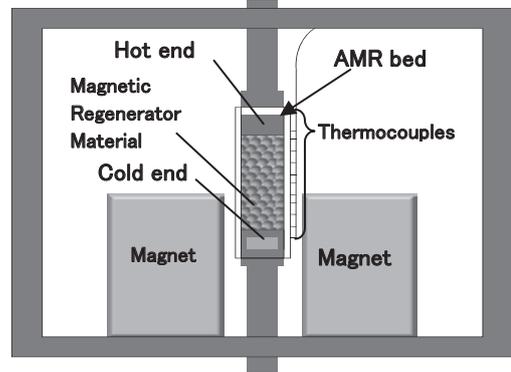


Fig.1 Schematic illustration of the experimental apparatus.

$$\rho_f c_f A \varepsilon \frac{\partial T_f}{\partial x} + \dot{m} c_f \frac{\partial T_f}{\partial x} = K_f A \varepsilon \frac{\partial^2 T_f}{\partial x^2} + \frac{Nu}{d_r} a_s A (T_r - T_f)$$

$$\rho_r c_r A (1 - \varepsilon) \frac{\partial T_r}{\partial t} = K_r A (1 - \varepsilon) \frac{\partial^2 T_r}{\partial x^2} + \frac{Nu}{d_r} a_s A (T_f - T_r) - A (1 - \varepsilon) \rho_r T_r \frac{\partial S_r}{\partial t}$$

$T_f$ : 流体温度     $c_f$ : 流体比熱     $d_r$ : 磁性体粒径     $m$ : 質量流量  
 $T_r$ : 磁性体温度     $c_r$ : 磁性体比熱     $a_s$ : 熱拡散率     $Nu$ : ヌッセルト数  
 $\rho_f$ : 流体密度     $K_f$ : 流体熱伝導率     $A$ : セル断面積     $S_r$ : 磁気エントロピー  
 $\rho_r$ : 磁性体密度     $K_r$ : 磁性体熱伝導率     $\varepsilon$ : 空隙率

Fig.2 Energy conservation equation.

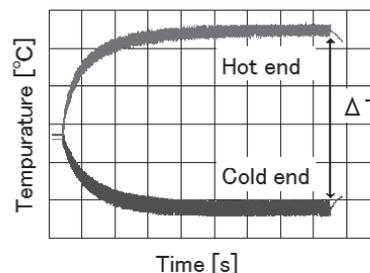


Fig.3 Temperature change of hot and cold ends in AMR cycle.

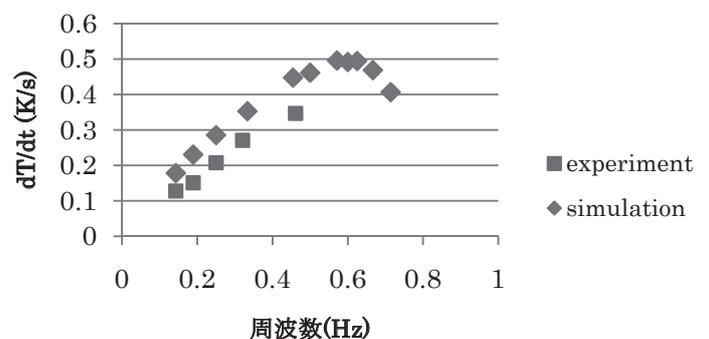


Fig.4 Cycle frequency dependence of dT/dt.

# 低温動作自励振動式ヒートパイプの熱輸送特性 —OHP の長さによる影響—

## Heat Transport Characteristics of cryogenic Oscillating Heat Pipes

### — Effects due to the length of OHPs —

夏目 恭平(総研大); 三戸 利行, 柳 長門, 田村 仁(NIFS); 玉田 勉, 式町 浩二, 平野 直樹, 長屋 重夫(中部電力)  
 NATSUME Kyohei (SOKENDAI); MITO Toshiyuki, YANAGI Nagato, TAMURA Hitoshi (NIFS)  
 ; TAMADA Tsutomu, SHIKIMACHI Koji, HIRANO Naoki and NAGAYA Shigeo (CEPCO)  
 E-mail: natsume@nifs.ac.jp

#### 1. はじめに

次世代の大型超伝導マグネット冷却方式として期待されている伝導・間接冷却方式に応用可能な、低温動作の自励振動式ヒートパイプ(Oscillating Heat Pipe: OHP)の開発を行っている。よりマグネットへの実用に適した両端冷却・中央加熱型 OHP を複数製作し、実験を行った。封入する作動流体として水素、ネオンを採用し、作動流体の封入量、パイプ径、入熱量及び OHP の長さを変化させ、等価的な熱伝導率を測定することによって低温動作特性を評価した。

#### 2. 自励振動式ヒートパイプ (Oscillating Heat Pipe: OHP)

OHP は細いパイプを何重にも折り曲げた形状をしている。封入された流体はパイプ内部に気泡と液柱が長手方向に交互に分布し、入熱部で液柱が蒸発し、冷却部で気泡は蒸発する。それに伴う圧力変化が振動流を駆動し、潜熱と顕熱の両方を以て熱は輸送される。

#### 3. 両側冷却・中央加熱型 OHP の開発

Table 1 に作動流体として水素、またはネオンを用いた場合の片側冷却・片側加熱型 OHP の実効的な熱伝導率を測定した実験結果を示す[1]。実験結果により、上側冷却下側加熱の向きで配置した OHP が最も高い実効的な熱伝導率を示した。低温で熱伝導用材料としてよく用いられる銅の残留抵抗比が 100 の場合の熱伝導率は、温度 20K、磁場 1T の条件下で 2,000 W/(m·K) 程度であり、それと比べると排熱についての OHP の有効性が確かめられる。しかし、下側冷却上側加熱の方向で設置した場合は安定な自励振動が観測されず、OHP としては動作しなかった。

このような設置方向による動作の不安定性を改善するために、両側冷却・中央加熱型 OHP が提案され、低温動作実験を行った。また、新たに熱輸送方向の長さを延長した OHP を製作し、OHP の長さの変化によって熱輸送特性や自励振動がどのように変わるかを調査した。Fig. 1 は製作した中央加熱型 OHP の写真である。外径 3mm, 内径 2mm の SUS の細管を 10

回折り返して両端を接続した構造で、中央に加熱部、両側に冷却端となる銅ブロックが半田付けされている。Fig. 2 に両側冷却・中央加熱型 OHP の低温動作特性実験の装置構成概念図を示す。OHP の両端の冷却部は冷凍機に銅バスバーを介して接続され、中央にある加熱部にヒーターで入熱し、両者の温度差から実効的な熱伝導率を求める。会議ではこれらの実験結果について報告する。

本研究は、核融合科学研究所、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)、科研費(21360456)の助成を受けたものである。

SUS capillary: outer diameter of 2mm, inner diameter of 1mm  
 Cu blocks: thickness of 13 mm, width of 30 mm

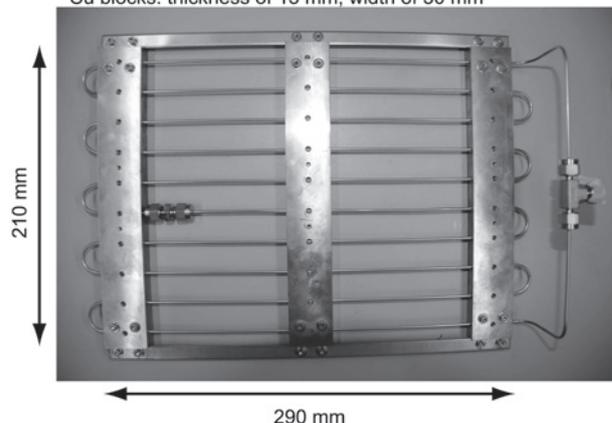


Fig. 1 A photograph of an experimental cryogenic middle-heating type OHP which consists of capillaries made of stainless steel and blocks made of copper.

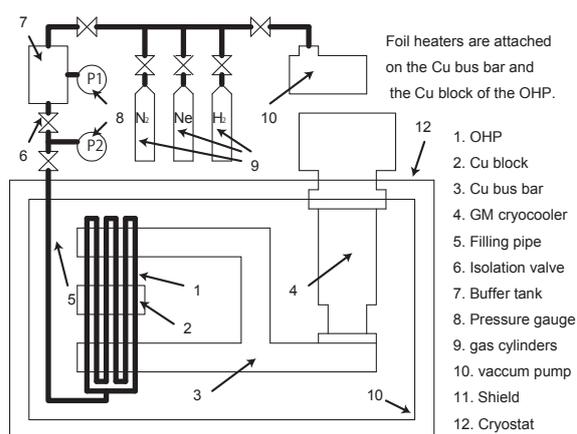


Fig. 2 Experimental setup of cryogenic middle-heating type OHPs measuring their thermal conductivities.

Fluid	Orientation [degree]	Liquid filling ratio [%]	Heat flux [W/mm <sup>2</sup> ]	Effective thermal conductivity [Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
H <sub>2</sub>	+90	50.9 – 70.0	0.03 – 0.46	8,500 – 11,480
H <sub>2</sub>	+45	50.0 – 70.4	0.05 – 0.82	2,220 – 10,330
H <sub>2</sub>	0	51.1 – 72.2	0.05 – 0.30	2,830 – 6,380
H <sub>2</sub>	-45 & -90	-	-	Did not work
Ne	+90	53.2 – 75.0	0.03 – 0.46	5,100 – 19,440
Ne	+45	50.6 – 70.1	0.10 – 0.82	6,000 – 17,000
Ne	0	69.8 – 86.1	0.03 – 0.82	6,000 – 8,500
Ne	-45 & -90	-	-	Did not work

Table 1 Experimental results of heat transfer characteristics of a OHP which consists of a 3.18 mm outer diameter and 1.56 mm inner diameter capillary made of stainless steel.

#### 参考文献

[1] T. Mito, et al.; Achievement of High Heat Removal Characteristics of Superconducting Magnets with Imbedded Oscillating Heat Pipes, IEEE Transactions on Applied Superconductivity (to be published.).

# 高温超電導線材の中性子照射実験:機械特性評価

## Neutron Irradiation Experiments on HTSs: Mechanical Properties

矢崎 真二郎, 青木 徹, 神林 佑, 柄澤 彰良, 石山 敦士(早大);宮原 信幸(放医研)

YAZAKI Shinjiro, AOKI Toru, KAMBAYASHI Yu, KARASAWA Akira, ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.); MIYAHARA Nobuyuki (NIRS)

E-mail: yzaki-snjiro@toki.waseda.jp

### 1. はじめに

固形がんの有効な治療法として重粒子線治療が注目されている。我々は、重粒子線がん治療装置の普及に不可欠である加速器の小型化・省エネルギー化の為に、加速器用コイルの超電導化を目指している[1]。コイル励磁時に超電導線材には機械的ひずみ加わる。さらに加速器応用ではコイルは放射線環境下中で利用される[2]。そこで中性子線を照射した、YBCO 線材とBi-2223 線材のひずみに対する超電導特性の評価実験を行ったので報告する。

### 2. 実験装置

試料線材の諸元を Table 1 に示す。また実験装置の概略図を図 1 に示す。試料線材は stainless steel(SUS304)製の U 字型の治具底面にはんだ付けされており、ひずみゲージをその線材中心部に接着した。Fig.1 の Handle を回し A 点を上下に動かすことにより、線材長手方向にひずみが印加される。

### 3. 実験方法

実験は液体窒素浸漬冷却、自己磁場下で行った。線材にひずみ  $\epsilon$  を印加してゆき、 $1 \mu V/cm$  基準で  $I_c$  を測定した。これを中性子線照射前後で行い、ひずみと  $I_c/I_{c0}$  の関係( $I_c/I_{c0}-\epsilon$  特性)の変化を調べた。ここで  $I_c$  の最大値を  $I_{c0}$  とした。

Table 1 Specification of HTS sample tapes

material	YBCO	Bi-2223
manufacturer	AMSC, 344Superconductors	Sumitomo, DI-BSCCO(TypeH)
process	MOD/RABiTS	CT-OP
width	4.4mm	4mm
length	60 ~ 70mm	60 ~ 70mm
thickness	0.22mm	0.22 mm
$I_c$ (nominal)	Min 70A	140A

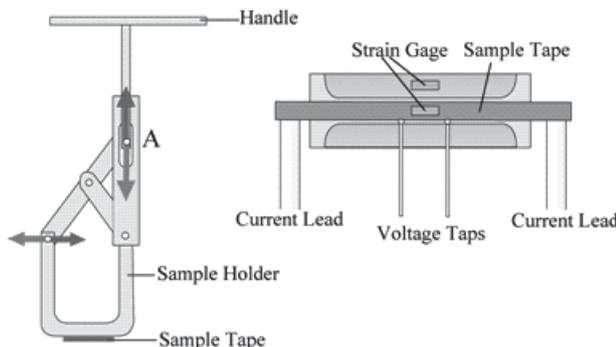


Fig.1 Experimental apparatus

### 4. 実験結果

YBCO 線材, Bi-2223 線材における結果をそれぞれ Fig.2, Fig.3 に示す。Before が中性子線照射前のもので、After が照射後である。

YBCO 線材, Bi-2223 線材ともに照射前・照射後でひずみに対する超電導特性の大きな変化は観測されなかった。

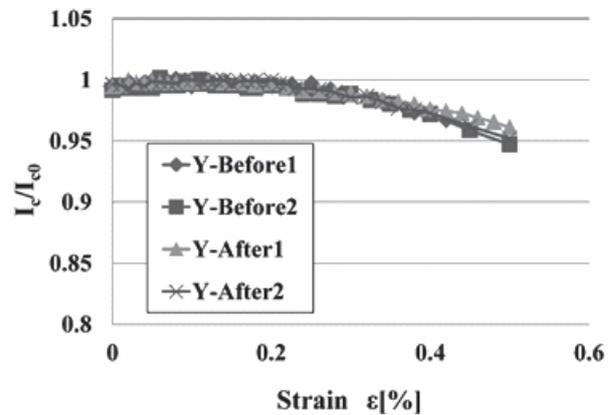


Fig.2  $I_c/I_{c0}-\epsilon$  relation on YBCO

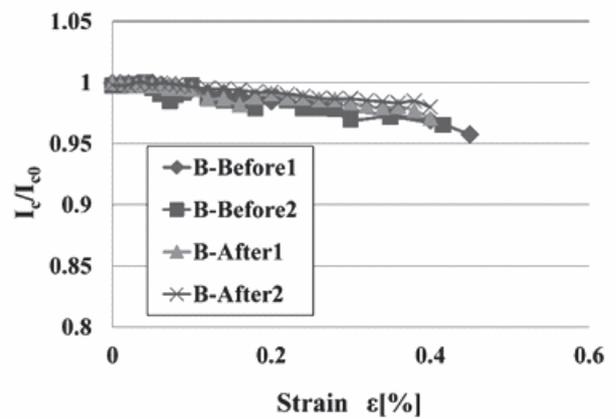


Fig.3  $I_c/I_{c0}-\epsilon$  relation on Bi-2223

本研究は「科研費(基盤研究B)」により実地したものである。

### 参考文献

1. A. Ishiyama, M. Fukuda, et al.: Development of the next generation superconducting cyclotron, ASC-10-033 (2010)
2. H. Ueda, A. Ishiyama, N. Miyahara, et al.: IEEE Trans. On Applied Superconductivity, Vol.19, No.3, (2009) pp.2872-2876

## 次世代高温超電導サイクロトロンの開発 Development of Next Generation HTS Cyclotron

石山 敦士, 王 旭東(早大); 植田 浩史, 福田 光宏, 畑中 吉治(阪大)  
長屋 重夫, 鹿島 直二(中部 電力); 宮原 信幸(放医研), 横田 渉(原子力機構)

ISHIYAMA Atsushi, WANG Xudong (Waseda Univ.); UEDA Hiroshi, FUKUDA Mitsuhiro, HATANAKA Kichiji (Osaka Univ.);  
NAGAYA Shigeo, KASHIMA Naoji (Chubu Electric Power Co.); MIYAHARA Nobuyuki (NIRS), YOKOTA Wataru (JAEA)  
E-mail: atsushi@waseda.jp

### 1. はじめに

少子高齢化が進み、地域医療の高度化が必須となっている中で、高度先進医療の1つであり、我が国が世界で最も多くの実績を積み重ねてきた「重粒子線がん治療」の普及拡大が強く望まれている。しかし医療用加速器として稼働しているものは、現在、放射線医学総合研究所の HIMAC と、兵庫県立粒子線医療センター、群馬大学重粒子線照射施設の3施設と、ドイツ1施設の4か所のみとなっている。これらの重粒子加速器はシンクロトン方式が採用されており、いずれも広大な敷地、莫大な建設コスト、数多くの電磁石の励磁・冷却のための運転コストおよび維持費のために普及が困難な状態にある。従って必要となる加速器の小型・軽量化とともに高効率化、省エネルギー化が、重粒子線がん治療の普及・拡大のために急務となっている。このような背景のもと、近年の高温超電導線材の急速な性能向上と応用機器開発の進展の状況から、我々は、HIMAC と同等の出力(400MeV/核子, 300nA)を持つ高温超電導技術を活用した小型・高効率・高性能の次世代超電導加速器の開発・実現を目指すことにした[1]。

### 2. 次世代高温超電導サイクロトロン

我々の目的は、医療用の粒子線超電導サイクロトロンの開発にある。医療用加速器として、常電導サイクロトロン(第一世代)、シンクロトン(第二世代)、FFAG(Fixed Field Alternating Gradient)(第三世代)と、次世代(第四世代)の加速器形式として我々が開発を目指している高温超電導加速器など[1][2]、次世代の粒子線治療用加速器の開発競争は激化しており、各方式において、それぞれの特徴を活かした開発が進められている。

サイクロトロンは、低コストでコンパクトであるだけでなく、医療応用に欠かせない安定性・信頼性・制御性・汎用性なども兼ね備えている。しかしながら、重粒子線治療用超電導サイクロトロンの設計研究は、欧州やロシアなどで低温金属系超電導線材である NbTi 線材を対象として始まっているものの、従来技術の延長ではコイル外径が6 mを超えてしまい、未だ設計段階である。我々が開発を進めている次世代高温超電導サイクロトロンは、高温超電導技術を活用して高効率化を図るとともに、Fig. 1 に示すように従来の AVF サイクロトロンの持つコンパクト性とリングサイクロトロンを持つ大出力への拡張性の両特性を合わせ持ったこれまでにない全く新しいサイクロトロンである。従来の加速器では常識であった鉄心の使用を行わずに、空心の高温超電導コイルだけで加速に必要な磁場形成を行うことが特徴となっている。そして、

- (1) 高温超電導コイルシステムを用いた高磁場化により、コンパクト・高効率で高エネルギーの出力が可能となる。
- (2) 鉄心を用いないので、空間自由度を最大限活かした機器の構成・配置による電磁場形成が実現できるため、大電流のビームを安定して加速し取り出すことができる。

この加速器システムが実現すると、がん治療用だけでなく、ナノ微細加工による新材料創製などの産業分野や、花卉、耐環境性農作物、環境浄化植物の育種など農業分野への応用等、我が国の成長戦略を加速する効果が期待でき、その開発意義は極めて大きいものがある。

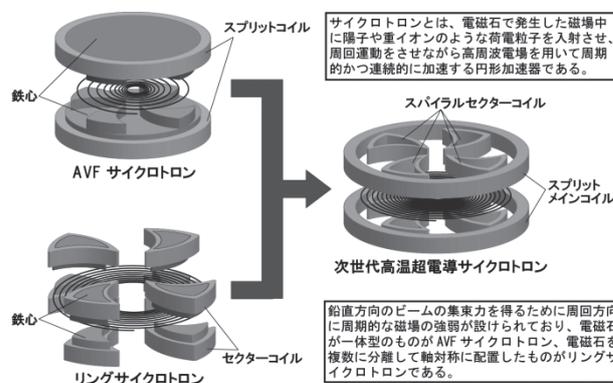


Fig. 1. Next Generation HTS Cyclotron

### 3. サイクロトロン的高温超電導化のメリット

重粒子線がん治療装置の加速器用コイルの高温超電導化には多くのメリットがある。すなわち、

- (1) 高磁場による小型化で普及率を大幅に高めることが期待できる。
- (2) サイクロトロンは高い磁場精度および安定度が要求されるが、従来の常電導(銅鉄)コイルでは熱による変形により磁場変動が生じやすく、またコイル励磁後、ジュール発熱と冷却水の温度が平衡するまで待つ必要がある。これに対し、高温超電導コイルの場合、夜間停止からの装置立ち上げが敏速に行え、高い磁場安定度が期待できる。
- (3) 超電導状態を保つための熱的安定性が極めて高いので、医療機器としての安全性・信頼性がより高いレベルで確保できる。
- (4) ジュール発熱がほとんどなく、消費電力が大幅に減らせる。

などが挙げられる。

### 4. おわりに

重粒子線がん治療は、我が国が世界に先駆けて導入・発展させ多くの実績を積み重ねてきた治療技術である。また一方、高温超電導技術は、その材料開発から機器応用に至るまで我が国が世界の最先端を走るキーテクノロジーの一つとなっている。この両技術分野の連携・融合に基づく「高温超電導サイクロトロン」の開発は、安心・安全、高齢化社会、地域医療高度化への対応、そして日本の成長戦略上極めて重要な開発テーマであると考えられる。発生磁場精度の問題など多くの技術課題があるが、その実現に向けて研究開発をさらに加速させて行きたいと考えている。

なお、本研究の一部は科研費(基盤研究B)によったことを付記する。

### 参考文献

1. 石山ら:電気学会超電導応用電力機器研究会資料, ASC-10-033, 2010.
2. 石山ら:電気学会超電導応用電力機器研究会資料, ASC-11-009, 2011.

# 次世代高温超電導サイクロトロンを試設計 Trial Design of Next Generation HTS Cyclotron

石山 敦士, 王 旭東(早大); 植田 浩史, 福田 光宏, 畑中 吉治(阪大)  
長屋 重夫, 鹿島 直二(中部 電力); 宮原 信幸(放医研), 横田 渉(原子力機構)

ISHIYAMA Atsushi, WANG Xudong (Waseda Univ.); UEDA Hiroshi, FUKUDA Mitsuhiro, HATANAKA Kichiji (Osaka Univ.);  
NAGAYA Shigeo, KASHIMA Naoji (Chubu Electric Power Co.); MIYAHARA Nobuyuki (NIRS), YOKOTA Wataru (JAEA)  
E-mail: hueda@rcnp.osaka-u.ac.jp

## 1. はじめに

重粒子線がん治療の普及・拡大のためには必要となる加速器の小型・軽量化とともに高効率化, 省エネルギー化が急務である。我々は, 近年の高温超電導線材の急速な性能向上と応用機器開発の進展の状況から, 放射線医学総合研究所の重粒子線がん治療装置 HIMAC と同等の出力 (400MeV/核子, 300nA) を持つ高温超電導技術を活用した小型・高効率・高性能の重粒子線がん治療用の次世代高温超電導サイクロトロンを開発・実現を目指している [1][2]。ここでは, 次世代高温超電導サイクロトロン用超電導コイルシステムの試設計を行った結果についてその一部を報告する。

## 2. 超電導コイルシステムの試設計

HIMAC と同等の出力 (400MeV/核子, 300nA) を持つ高温超電導コイルとして, 等時性磁場発生用のメインコイル (3対のスプリットコイルを想定) と, AVF (Azimuthally Varying Field) 発生用のスパイラルセクターコイル (4対を想定) の試設計を行った。Fig. 1 に設計手順を示し, 以下に概要を記す。

### 2.1 スパイラルセクターコイルの設計

(1) ビーム取り出し半径および平均磁場  $B_{ave}$  の設定 6 価の炭素イオンを 400 MeV まで加速するとして, 平均磁場  $B_{ave}$  は 6 T とした。この時ビーム引出半径は 1.06 m となる。

(2)  $B_{hill}$ ,  $B_{valley}$  の設定 フラッター (磁場の段差の度合い) を,  

$$F^2 = (B_{hill}/B_{ave} - 1)(1 - B_{valley}/B_{ave}) = 0.06$$
 とする。ここで,  $B_{hill}$ ,  $B_{valley}$  はそれぞれ AVF の hill 部と valley 部の磁場である。

(3) スパイラル角 ( $\epsilon$ ) の計算 鉛直方向のベータatron 振動数が  $0 < \nu_z < 0.5$  となるように, 径方向位置  $r$  とスパイラル角 ( $\epsilon$ ) の関係を求めた。ここで引出半径 1.06 m を想定し, 巻線の最小曲率半径は 50 mm, 厚さ 5 cm, 幅 5 cm とした。

### 2.2 メインコイルの設計

セクターコイルが納まるメインコイルを設計する。中心より最も離れたセクターコイルの巻線の位置は 2.1 の結果より  $r = 1.15$  m なので, メインコイルの内半径を 1.2 m とした。セクターコイルで発生する磁場の周方向平均した分布を Fig. 2 に示す。所望の等時性磁場分布と併せて示した。この差の磁場をメインコイルで発生させることになる。設計条件を以下のように設定し, コイル形状・位置等を設計変数として GA-SA 法を用い, 使用超電導線材量が最少となるよう設計最適化を試みた。

- 1) YBCO 線材は幅 1 cm, 厚さ 200  $\mu$ m (基板, 安定化銅を含む) とし,  $I$ - $V$  特性の磁場強度・磁場角度依存性を考慮する。巻線は絶縁等を含めて占積率を 0.7 とする。
  - 2) 冷凍機伝導冷却で運転温度は 20K, 運転電流は負荷率 0.7 とする。複数のスプリットコイル (今回は 3 対を想定) は同一電源で励磁される。
  - 3) コイルに加わる応力 ( $BJR$ ) は 600 MPa 以下に抑える。
- 以上より得られたコイルの外観を Fig. 3 に示す。

## 3. おわりに

次世代高温超電導サイクロトロンのための超電導コイルシステムの設計を試みた。多くの開発課題はあるが, 今後のコイル化技術の進展により実現可能性は高いと考える。

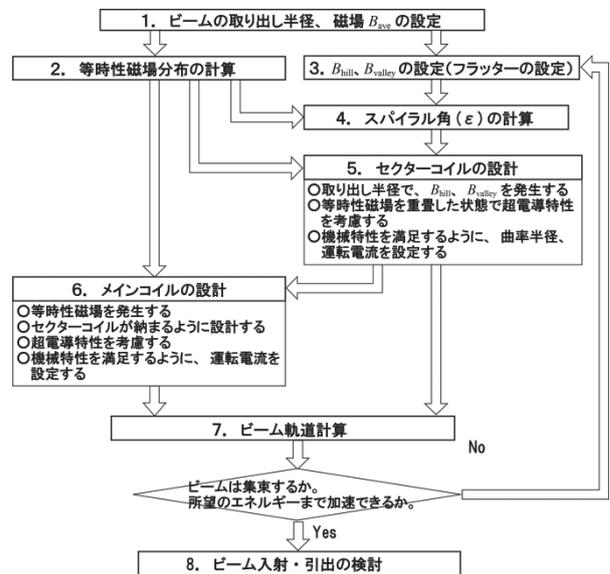


Fig. 1. Flowchart of design of HTS coils for next generation cyclotron

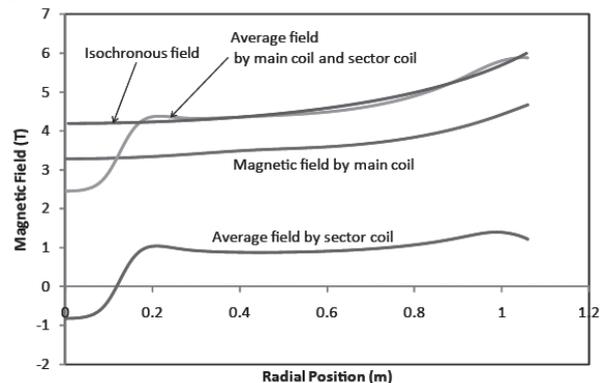


Fig. 2. Average magnetic field in a radial direction .

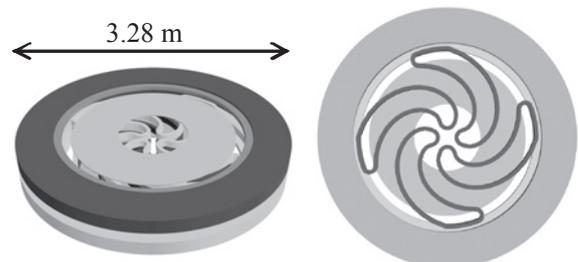


Fig. 3. Schematic drawing of superconducting coils for next generation cyclotron.

なお, 本研究の一部は科研費 (基盤研究B) に依ったことを付記する。

## 参考文献

1. 石山ら: 電気学会超電導応用電力機器研究会資料, ASC-10-033, 2010
2. 石山ら: 電気学会超電導応用電力機器研究会資料, ASC-11-009, 2011

# 加速器用マグネット開発に向けたイットリウム系コイルの製作

## (1) 遮蔽電流による付加的磁場測定用コイル

### Fabrication of YBCO test coils for the accelerator magnet development

#### (1) YBCO coils for measurement of additional magnetic field by shielding current

小柳 圭, 高山 茂貴, 戸坂 泰造, 田崎 賢司, 来栖 努, 吉行 健(東芝); 雨宮 尚之(京大・工); 荻津 透(KEK)  
 KOYANAGI Kei, TAKAYAMA Shigeki, TOSAKA Taizo, TASAKI Kenji, KURUSU Tsutomu, YOSHIYUKI Takeshi (Toshiba);  
 AMEMIYA Naoyuki (Kyoto University); OGITSU Toru (KEK)  
 E-mail: kei.koyanagi@toshiba.co.jp

#### 1. はじめに

加速器用マグネットへの高温超伝導線材の適用を目指し、イットリウム系(Y系)線材を使ったコイル開発を進めている[1]。テープ形状であるY系線材を用いたコイルでは、線材の超伝導層に磁場が加わると磁化電流が誘起され、この磁化電流による磁場(付加的磁場)が輸送電流によるコイル磁場に重畳されて、加速器のビーム軌道部分で必要とされる磁場の時間的安定性を乱してしまう問題が生じる[2]。この付加的磁場が加速器に要求される磁場精度に対して与える影響を明らかにするためには、超伝導特性に劣化がないコイルで磁場を評価することが必要条件となる。そこで、Y系線材を用いた付加的磁場測定用のレーストラック型パンケーキコイルを製作し、超伝導特性を評価した。

#### 2. コイルの製作

コイルは最内層が曲率半径 40mm、直線部の長さが 250mm のレーストラック形状とし、スプリットペアに配置して付加的磁場測定試験に供するため2個製作した。主要諸元を Table 1 に、コイルの外観を Fig.1 に示す。各コイルは IBAD-PLD 法によるY系線材を長さ約 63m 使用して巻線し、室温硬化型樹脂により真空含浸した。

Table 1 Specifications of YBCO test coil and YBCO tape

Type of coil winding	Single pancake, Epoxy impregnated
Outside dimension	381 mm × 132 mm
Coil height	6 mm
Inner winding radius	40 mm
Outer winding radius	66 mm
Number of turns	76 / pancake
Tape length	63 m / pancake
Number of pancake coils	2
YBCO tape width × thickness	5 mm × 0.2 mm
YBCO tape $I_c$ (77K, self field)	163 A (End to End)

#### 3. コイルの特性評価結果

製作した2コイルを液体窒素中で冷却し、通電試験した。コイルのV-I特性をFig.2に示す。コイルn値はそれぞれ28, 31であり、 $10^{-9}$ V/cmの低電界領域までn値が高く、良好な超伝導特性を有していることが確認できた。超伝導特性に劣化は無く、付加的磁場評価用のコイルとしての必要条件を満たしていることを確認した。

#### 謝辞

本研究は、科学技術振興機構の産学イノベーション加速事業【戦略的イノベーション創出推進】の支援によって行われた。

#### 参考文献

1. N. Amemiya, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 82 (2010) p.184
2. N. Amemiya, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 20, no. 3, p. 364-367, 2010.

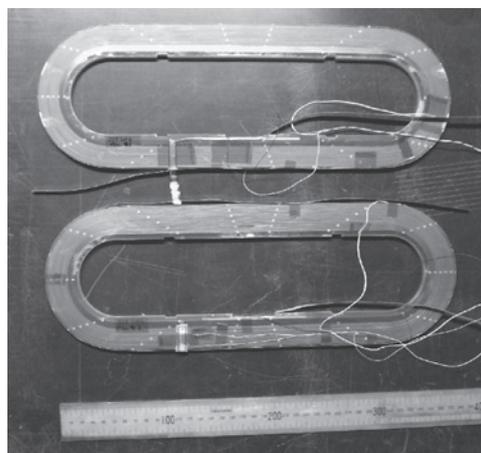


Fig.1 Outer view of YBCO test coils for measurement of additional magnetic field

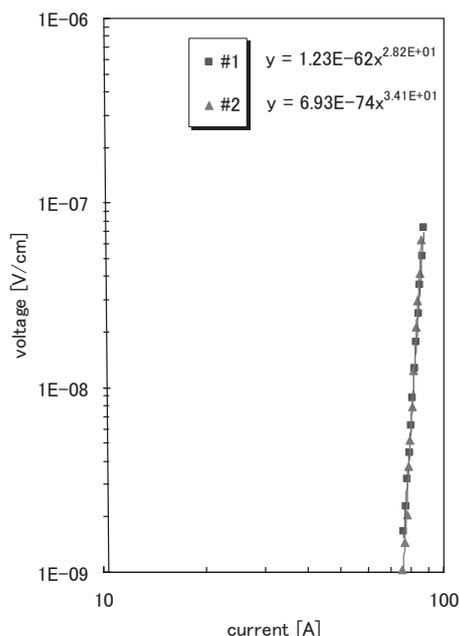


Fig.2 V-I characteristics of each coil at 77 K

# 加速器用マグネット開発に向けたイットリウム系コイルの製作

## (2) 固定磁場強収束加速器向けの巻線要素試作

### Fabrication of YBCO test coils for the accelerator magnet development

#### (2) YBCO small test coils for FFAG accelerator magnet

小柳 圭, 高山 茂貴, 戸坂 泰造, 田崎 賢司, 来栖 努, 吉行 健(東芝); 森 義治(京大・原子炉); 雨宮 尚之(京大・工); 荻津 透(KEK)  
 KOYANAGI Kei, TAKAYAMA Shigeki, TOSAKA Taizo, TASAKI Kenji, KURUSU Tsutomu, YOSHIYUKI Takeshi (Toshiba);  
 MORI Yoshiharu, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto Univ.); OGITSU Toru (KEK)  
 E-mail: kei.koyanagi@toshiba.co.jp

#### 1. はじめに

加速器用マグネットへの高温超伝導線材の適用を目指し、イットリウム系(Y系)線材を使ったコイルの巻線技術の検討を進めている[1]。このプロジェクトでは、加速器を実現するための幾つかのマグネット案について検討を進めているが、直流励磁マグネットのモジュールを並べることで構成でき、強収束という特徴を有する固定磁場強収束(FFAG)加速器のマグネットは、パルス運転のマグネットと比べて交流損失が軽減できる利点があるため超伝導線材を適用し易い。一方で、マグネットにY系線材を適用するには、単純なフラットワイズ方向だけではない変形を加えながら巻線が必要となることが想定され、超伝導特性への影響が懸念される。ここでは、Y系線材を使ってネガティブバンドを有する試作検証用の“巻線要素”を試作して特性を評価した結果について報告する。

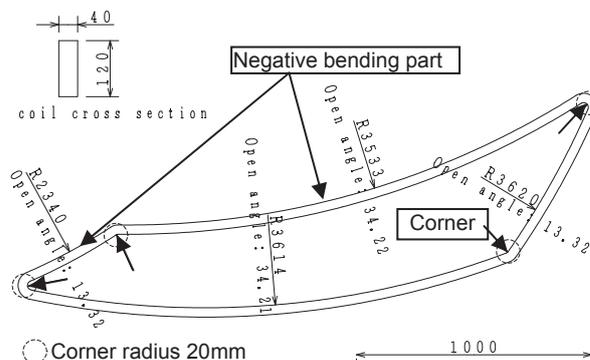


Fig.1 Superconducting coil configuration of FFAG accelerator magnet

#### 2. 加速器用マグネットの設計

FFAG 加速器の代表的なマグネット形式として、ラディアルセクタ型とスパイラルセクタ型がある。マグネット案のひとつとして、鉄心を使用したスパイラルセクタ型 FFAG 加速器用の超伝導マグネット(スーパーフェリク)に関して、三次元マグネット磁場設計を行った。設計したマグネットの超伝導コイル部分の構造を Fig.1 に示す。直径約 9m(ビーム軌道半径 3.4m)の加速器の1セクタ部分であり、最大外形は約 3m である。ビーム軌道で要求される磁場の空間分布は磁極設計で最適化するとし、巻線部は複雑な三次元形状にせずテープ線を平面に巻くパンケーキ状の巻線で構成する。コイルは巻線部が内側に凹んだネガティブバンド部分を有し、その曲率半径は最小で 2340mm とした。コイルの角部の曲率半径は 20mm とした。

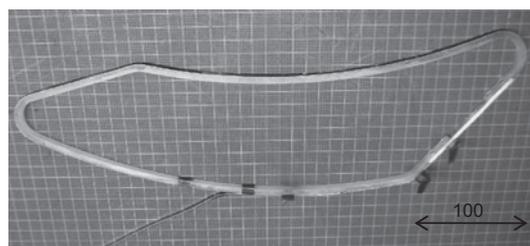


Fig.2 Outer view of YBCO small test coil

#### 3. 巻線要素の試作・試験

マグネットの設計をもとに、線材長 1m で1ターンを巻く、実機大の約 1/8 の寸法となる巻線要素を設計した。外形は約 400mm で、ネガティブバンド部の曲率半径は 442mm、角部の曲率半径は実機大と同じ 20mm とした。巻線要素の試作には、IBAD-PLD 法による幅 5mm、 $I_c=170A$ (77K, 自己磁場)のY系線材を使用した。巻枠はFRPで作製し、電極を設けて線材の端部を固定して、線材を樹脂で接着させながら長さ約 900mm を使って1ターンを巻線した。試作した巻線要素の外観を Fig.2 に示す。1ターンの両端には電圧タップを設け、液体窒素中で冷却して通電し、コイルの発生電圧挙動を観察した。測定したコイルの V-I 特性を Fig.3 に示す。 $10^{-9}V/cm$  の低電界領域まで n 値が 31 と高い特性を示したことから、ネガティブバンドを有する形状に巻いた線材が良好な超伝導特性を有していることを確認した。

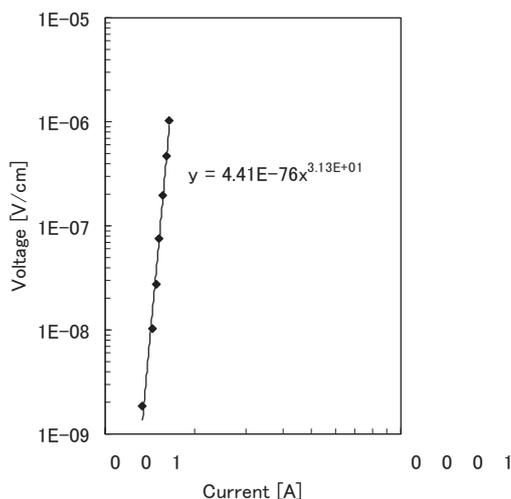


Fig.3 V-I characteristics of the small test coil

#### 4. まとめ

スパイラルセクタ型の FFAG 加速器用マグネットを想定したネガティブバンドを有する巻線要素を試作し、超伝導特性に劣化の無いことを確認した。引き続き、ターン数を増やしたコイル試作を進めている。

#### 謝辞

本研究は、科学技術振興機構の産学イノベーション加速事業【戦略的イノベーション創出推進】の支援によって行われた。

#### 参考文献

1. N. Amemiya, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 82 (2010) p.184

X線CTによるMgB<sub>2</sub>線材の組織観察Microstructural observation of MgB<sub>2</sub> wires by x-ray computed tomography

波多 聡, 嶋田 雄介, 光原 昌寿, 池田 賢一, 中島 英治(九大); 松本 明善, 戸叶 一正, 熊倉 浩明, 北口 仁(NIMS);  
J. H. Kim, S. X. Dou (Wollongong 大)

HATA Satoshi, SHIMADA Yusuke, MITSUHARA Masatoshi, IKEDA Ken-ichi, NAKASHIMA Hideharu (Kyushu University);  
MATSUMOTO Akiyoshi, TOGANO Kazumasa, KUMAKURA Hiroaki, KITAGUCHI Hitoshi (NIMS);  
KIM Jung Ho, DOU Shi Xue (University of Wollongong)  
E-mail: hata.satoshi.207@m.kyushu-u.ac.jp

## 1. 緒言

MgB<sub>2</sub>線材の $J_c$ は、MgB<sub>2</sub>薄膜の $J_c$ と比べると一桁程度低い。これは、MgB<sub>2</sub>超伝導体の内部組織が作製プロセスによって大きく異なるためと考えられる。特に、線材の場合には、ポアやクラック、未反応原料粉末などの存在により、超伝導領域およびその連結度が減少することが考えられている。本研究ではこうした線材の内部組織を観察するために、三次元可視化技術の一つであるX線CT(コンピューター断層撮影法)を用い、その有効性を検討した。

## 2. 実験方法

パウダーインチューブ(PIT)法<sup>(1)</sup>および内部Mg拡散(IMD)法<sup>(2)</sup>により、Mgと非晶質Bを熱処理で反応させてMgB<sub>2</sub>超伝導体を得た。 $J_c$ 向上を目的としてリンゴ酸(C<sub>4</sub>H<sub>6</sub>O<sub>5</sub>)またはSiCを適量添加した。線材化は、原料を金属管に充填し、冷間加工を熱処理前に施すことで行った。金属管内部のMgB<sub>2</sub>線材の部分を取り出し、X線CTによる組織観察を行った。

X線CTによるMgB<sub>2</sub>材料の組織観察については先行研究があり<sup>(3)</sup>、そこではミクロンオーダーの内部組織が三次元可視化されている。一方、今回用いたX線CT装置(Xradia製nanoXCT-100(研究室据置型)およびnanoXCT-S100(放射光施設ビームライン取付型))では、フレネルレンズを用いた光学系の採用により空間分解能が100nm以下に達する。CT画像データ取得条件は以下のとおりとした。入射X線エネルギー:5-12keV, Zernike位相コントラストモード, 記録画像の視野サイズ15×15μm~30×30μm, 対応する画素サイズ16nm, 試料回転角度0~180°, 撮像枚数181~1609枚, 三次元画像再構成ソフトウェアTXMReconstructorを使用。電子顕微鏡(SEM, TEM, STEM)による組織観察結果と比較しつつ、X線CT画像の解釈を試みた。

## 3. 結果

得られたX線CT画像の一例をFig.1に示す。PIT線材(a)および(b)では、MgB<sub>2</sub>多結晶を主とする高密度領域(明るい領域)と、ポアまたは未反応Bを主とする低密度領域(暗い領域)が、サブミクロンからミクロンのサイズで分布していることがわかる。低密度領域が粗大な無添加線材(a)と微細なリンゴ酸添加線材(b)を比べると、後者の方が低密度領域の体積率が小さいこと(無添加線材で50%, リンゴ酸添加線材で40%)が、三次元画像データの計測により明らかとなり、パーコレーションモデル<sup>(4)</sup>による $J_c$ 特性解析との関連付けが期待できる。

IMD線材(c)では、PIT線材のようなサブミクロンからミクロンオーダーの低密度領域の分布は見られない一方で、クラックが存在している。クラック部は結晶内部よりも明るく、所々に粒状のコントラストも観察される。これは、MgB<sub>2</sub>(2.6g/cm<sup>3</sup>)よりも高密度のMgO(3.7g/cm<sup>3</sup>)あるいはSiC(3.3g/cm<sup>3</sup>)の存在を示唆している。超伝導電流がほとんど流れない別の試料のX線CT画像では、高密度領域がクラック面を覆うように分布していた。こうした不純物相の分布が超伝導領域の連結を著しく低下させているものと考察された。

本研究は、文部科学省先端研究施設共用イノベーション創出事業、Xradia社ならびにキヤノンマーケティングジャパン社の支援を受けました。ここに謝意を申し上げます。

## 参考文献

1. J. H. Kim *et al.*, *J. Appl. Phys.* **104** (2008) 063911.
2. K. Togano *et al.*, *Supercond. Sci. Technol.* **22** (2009) 015003.
3. P. Badica *et al.*, *Supercond. Sci. Technol.* **21** (2008) 115017.
4. M. Eisterer *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **90** (2003) 247002.

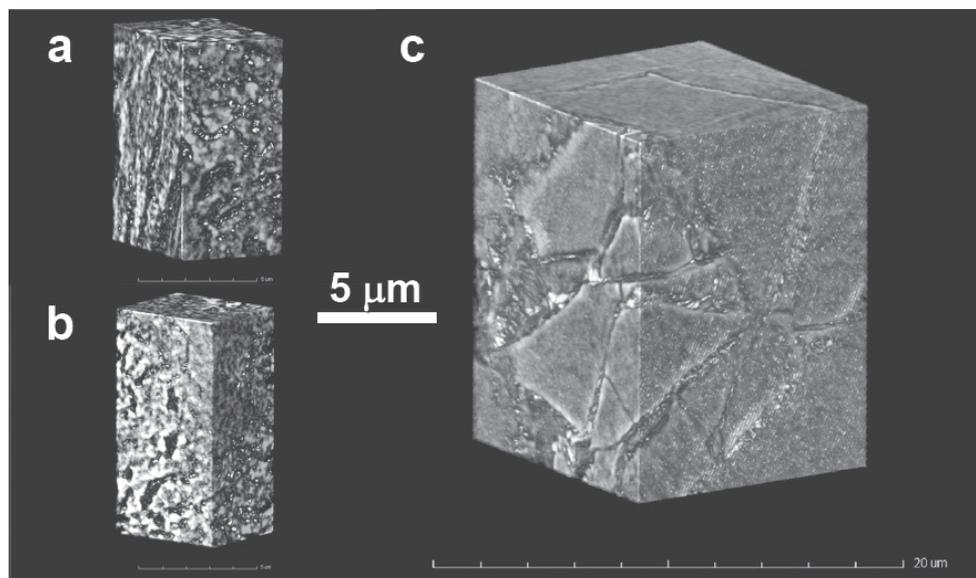


Fig. 1. Three-dimensional reconstructions of MgB<sub>2</sub> wire samples. (a) Non-doped and (b) malic acid-doped wires prepared by a powder-in-tube method and (c) SiC-doped wire prepared by an internal Mg diffusion method.

## 拡散法MgB<sub>2</sub>線材における不純物添加効果

### The effect of impurity addition to the critical current density of internal Mg diffusion processed MgB<sub>2</sub> wires

葉 術軍, 松本 明善, 戸叶 一正, 熊倉 浩明 (NIMS)

Shujun Ye, Akiyoshi MATSUMOTO, Kazumasa TOGANO, Hiroaki KUMAKURA (NIMS)

Email: YE.Shujun@nims.go.jp

#### 1 introduction

Internal Mg diffusion (IMD) process can achieve high density MgB<sub>2</sub> layer in wires and hence high critical current density ( $J_c$ ). Carbon substitution for boron enhancing upper critical field ( $B_{c2}$ ) is also effective to enhance  $J_c$  of MgB<sub>2</sub>. We have recently shown that SiC and some liquid aromatic hydrocarbon (toluene, dimethylbenzene and so on) co-addition can enhance the  $J_c$  of mono core MgB<sub>2</sub> wires <sup>(1)</sup>. In the present contribution, we discuss the  $J_c$  of the IMD processed mono core MgB<sub>2</sub> wires under different conditions, viz. with pure B powder, B powder with additive like SiC or toluene, and B powder with SiC+toluene co-addition.

#### 2 experiment

Amorphous B(99.9%, 300 Mesh) and 10mol% nano-SiC were mixed with toluene, and then packed into the gap between an Fe tube and a pure Mg rod which was coaxially inserted into the Fe tube. The composite was groove rolled and drawn into a wire ( $\Phi$  1.2 mm) and then heat treated at 670°C for 3 hours. The transport critical current ( $I_c$ ) of the wires were measured by using the four-probe resistive method.  $J_c$  was calculated for the cross-sectional area of reacted layer, and the cross-sectional area of reacted layer was different by wire. The composition and micro-structure of the samples was investigated by x-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM).

#### 3 results and discussion

Fig.1 shows  $J_c$  properties of the IMD processed wires. The wire with SiC+toluene co-addition shows higher  $J_c$  value than with SiC added wire. Toluene added wire shows lower  $J_c$  than SiC added wire but higher than pure wire in the high magnetic field region. The SiC+toluene co-added wire shows  $J_c$  value of 50kA/cm<sup>2</sup> at 4.2K&10T, which is the highest of mono core MgB<sub>2</sub> wires reported so far.

XRD pattern (Fig.2) indicates that the amount of C substitution for B for SiC+toluene co-added wire is higher than SiC and toluene added wires. This is one of the reasons for  $J_c$  enhancement. SEM images (Fig.3) show that the average grain size of MgB<sub>2</sub> in the wires with toluene addition are smaller than that without toluene. This is a possible reason for  $J_c$  enhancement because small grain size increases pinning center at grain boundaries and hence  $J_c$  <sup>(2)</sup>.

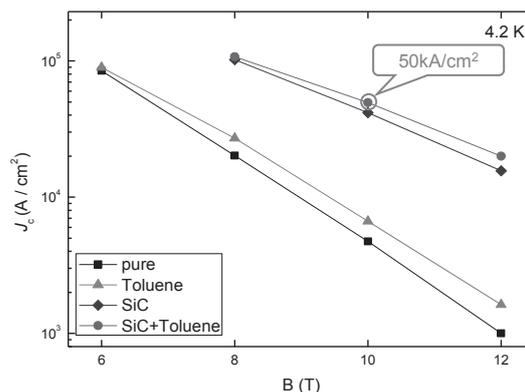


Fig. 1  $J_c$ -B curves of IMD processed MgB<sub>2</sub> wires

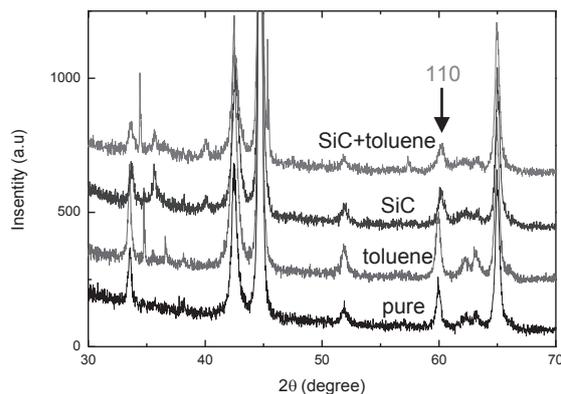


Fig. 2 XRD pattern of IMD processed MgB<sub>2</sub> wires

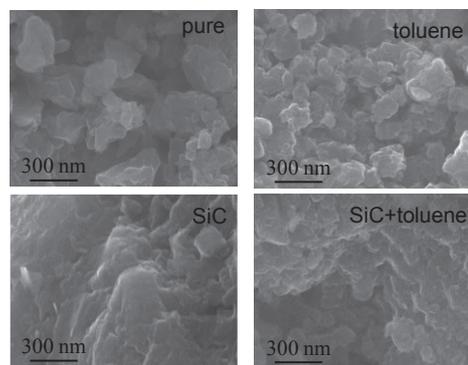


Fig. 3 SEM images of IMD processed MgB<sub>2</sub> wires

#### references

- (1) S. Ye, et al.: Physica C in press.
- (2) P. Mikheenko et al.: Supercond. Sci. Technol. 20 (2007) S264.

## 新しいカプセル法による MgB<sub>2</sub> バルクの作製

A proposal of new fabricating technique of large MgB<sub>2</sub> bulk by a capsule method

内藤 智之、佐々木 智久、藤代 博之(岩手大)

NAITO Tomoyuki, SASAKI Tomohisa, FUJISHIRO Hiroyuki (Iwate Univ.);

E-mail: tnaito@iwate-u.ac.jp

### 1. はじめに

RE-Ba-Cu-O超電導バルク体は磁場を捕捉させることでテスラ級の疑似永久磁石にすることが出来る。しかし、粒界における弱結合の影響を避けるために単一粒とする必要があり、結晶成長の再現性やバルク内の磁束ピン止め分布の均一性など克服すべき課題が多い。MgB<sub>2</sub>の超電導転移温度は約40Kと低いものの弱結合の問題がなく多結晶で大型バルク体を作製できると期待される。これまでにいくつかのグループでMgB<sub>2</sub>バルク体の作製が試みられており、テスラ級の磁石化に成功している[1,2]。我々は、市販のステンレス製フランジと銅製ガスケットを用いたカプセル中でMgB<sub>2</sub>バルク作製を試みた。今回、この比較的簡便な作製方法で得られたMgB<sub>2</sub>バルクの捕捉磁場特性について報告する。

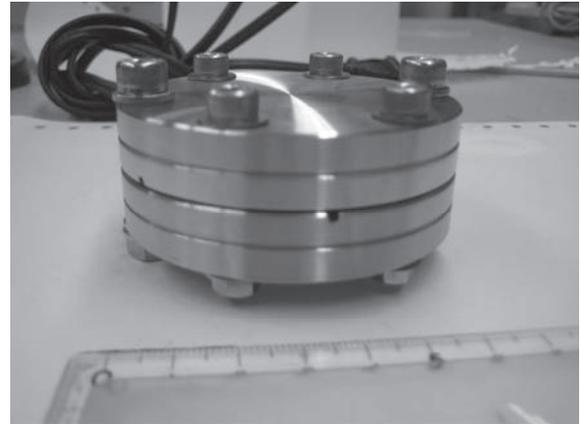


Fig.1 Photograph of a capsule for the fabrication of MgB<sub>2</sub> bulk.

### 2. 実験方法

MgB<sub>2</sub>バルク作製に使用したカプセルをFig.1に示す。MgB<sub>2</sub>バルク前駆体は、モル比Mg:B=1.1:2の混合粉を直径20mm、厚さ5mmのペレットに成形したものとした。前駆体をフランジに加工した穴に装填し、銅製ガスケットとの反応を防ぐためのステンレス板で覆った後、銅製ガスケットともう一枚のステンレス製フランジで密封しカプセルとした。前駆体装填からカプセル密封までの工程は、グローブボックスを用いてAr雰囲気で行った。カプセルを800℃で6時間熱処理しMgB<sub>2</sub>バルクを作製した。Fig.2に出来上がったMgB<sub>2</sub>バルクの写真を示す。



Fig.2 Photograph of an as-sintered MgB<sub>2</sub> bulk in the stainless steel flange.

冷凍機冷却型超電導マグネットを用いて5テスラの磁場中でMgB<sub>2</sub>バルクを冷却して磁場を捕捉させた。極低温用ホール素子を用いてバルク中心の捕捉磁場を測定した。

### 3. 実験結果および考察

直径20mmバルクは17Kで1.3Tの磁場を捕捉した。この値は報告例[2]に比べるとやや低い値であったが、この簡便なカプセル法で比較的高い磁場捕捉能力を有するMgB<sub>2</sub>バルクを作製出来ることが分かった。今後、捕捉磁場の2次元分布測定を実施する予定である。講演では2次元捕捉磁場分布から見たバルクの均質性なども併せて議論する予定である。

### 参考文献

- [1] R. V. Vliznichenko *et al.*: Appl. Phys. Lett. **83** (2003) p.4360
- [2] M. Tomita *et al.*: Abstracts of CSJ Conference **83** (2010) p.86

## Mg(BH<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 粉末を用いて作製した PIT 法 MgB<sub>2</sub> 線材の超伝導特性 Superconducting properties of PIT-processed MgB<sub>2</sub> tapes using Mg(BH<sub>4</sub>)<sub>2</sub> powder

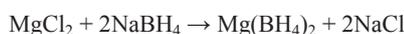
藤井 宏樹, 小澤 清, 熊倉 浩明(NIMS)  
FUJII Hiroki, OZAWA Kiyoshi, KUMAKURA Hiroaki (NIMS)  
E-mail: fujii.hiroki@nims.go.jp

(序)

MgB<sub>2</sub> 線材は、一般的に PIT 法で作製されているが、優れた  $J_c$  特性を得るためには結晶粒間結合の強化が重要である。これには、活性な粉末を使用することが有効であるが、in situ 法においては、活性な Mg 源として、Mg 超微粒子や MgH<sub>2</sub> の使用などが有効である。一方、B 源としては、高特性を得るため、輸出規制の対象となっている米国製アモルファス硼素 (a-B) を通常使用する。この a-B も Mg 粉と同様、表面が酸化し、劣化しており、弱結合の要因となっているものと考えられる。本研究ではこの a-B を用いずに、Mg(BH<sub>4</sub>)<sub>2</sub> の熱分解を経た MgB<sub>2</sub> の生成によって、PIT 法 MgB<sub>2</sub> 線材を作製した。

(実験)

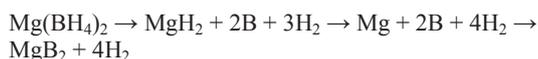
以下の反応式に従って先ず Mg(BH<sub>4</sub>)<sub>2</sub> を得た。



上記出発原料を遊星ボールミルで 20 h、定比 1:2 で混合した後、その粉末をエーテル中 48 h 還流させた。続いて濾過によって、NaCl を除去した後、その粘性濾液を真空中 230°C で乾燥させて白色粉末を得た。この粉末や、この粉末を Ar 気流中、種々の温度で加熱分解させたものを充填粉として、PIT 法で Fe シース線材を作製した後、Ar 気流中加熱処理を行った。こうして得られた線材試料の組織や特性を評価した。

(結果)

Mg(BH<sub>4</sub>)<sub>2</sub> には低温  $\alpha$  相と高温  $\beta$  相とが存在するが、得られた白色粉末は、XRD からほぼ単相の  $\beta$ -Mg(BH<sub>4</sub>)<sub>2</sub> と同定された。この Mg(BH<sub>4</sub>)<sub>2</sub> を Ar ガス雰囲気中で加熱分解させると、以下の反応式に従い、ほぼ単相の MgB<sub>2</sub> が得られた。



XRD や TG-DTA の測定結果から、最初の反応はおおよそ 300°C で進み、引き続きおおよそ 350°C で MgH<sub>2</sub> の分解が起こり、450°C で MgB<sub>2</sub> が生成することが確認された。

Fig. 1 に線材試料の XRD 図を示す。煅焼の有無や温度に関わらず、粉末試料での結果と対応して、ほぼ単相の MgB<sub>2</sub> コア層の生成が確認された。

一方、 $J_c$  特性は煅焼の有無で異なる結果が得られた。Mg(BH<sub>4</sub>)<sub>2</sub> を充填粉として用いた場合、4.2 K、0 T では 20 A 程度の  $J_c$  が得られたが、1 T の磁界印加によって 0 A となった。線材断面組織を観察すると、加熱処理後の MgB<sub>2</sub> コア層の密度が低いことが確認された。これは Mg(BH<sub>4</sub>)<sub>2</sub> から MgB<sub>2</sub> が生成する際に 1/3 ほど体積収縮が起こるためであり、これに伴う弱結合が  $J_c$  特性の低下を引き起こしたものと考えられる。

そこで、Mg(BH<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 煅焼粉末を用いて線材作製を行ったところ、その  $J_c$  特性は、煅焼温度に関わらず、通常の Mg + a-B 混合粉末を使用した線材程度に向上した。Fig. 2 にその線材試料の  $J_c$ - $B$  特性を示す。この向上は煅焼処理によって MgB<sub>2</sub> 生成時の体積収縮が抑えられたためだと考えられる。しかしながら、その特性は MgH<sub>2</sub> + a-B 混合粉使用線材の  $J_c$  特性よりも劣っていた。

線材試料の磁化測定を行ったところ、 $\Delta T_c$  や交流磁化率の振幅依存性から、結晶粒間の弱結合が示唆されており、粒間に不純物相が析出しているものと思われる。この原因として、

煅焼粉は大気中での劣化が激しいことや、自作 Mg(BH<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 粉末にはアモルファス状の不純物が含まれている可能性があることが挙げられる。これらが  $J_c$  の一層の向上の妨げとなっているものと考えられる。

(謝辞)

本研究の一部は科研費基盤研究 C(No.20560312)の援助により行われました。

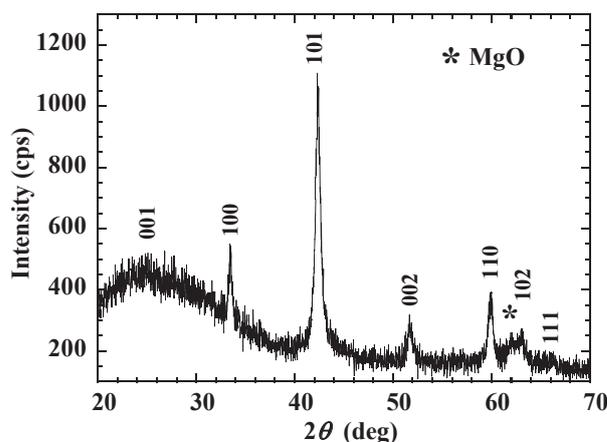


Fig. 1. XRD pattern of PIT-processed MgB<sub>2</sub> tape using  $\beta$ -Mg(BH<sub>4</sub>)<sub>2</sub> calcined at 400°C. The tape was heat treated at 570°C in a flow of Ar gas. XRD peaks assigned to MgB<sub>2</sub> are indexed.

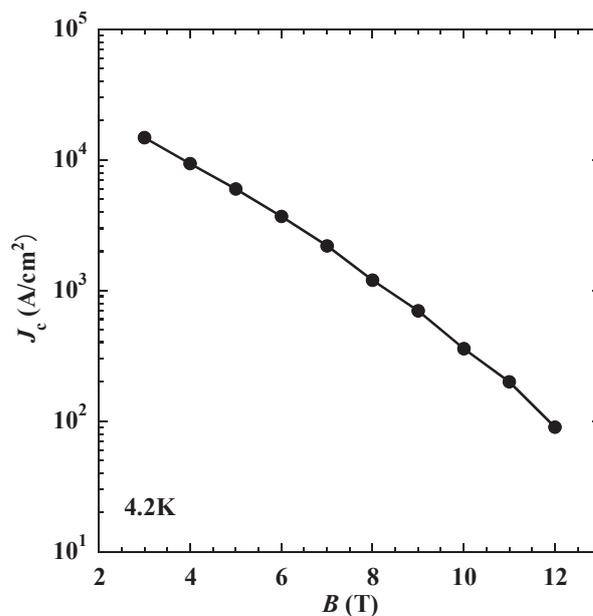


Fig. 2.  $J_c$ - $B$  property of PIT-processed MgB<sub>2</sub> tape using  $\beta$ -Mg(BH<sub>4</sub>)<sub>2</sub> calcined at 400°C. The tape was heat treated at 570°C in a flow of Ar gas. The measurement was carried out at 4.2 K.

## Mg<sub>2</sub>Cu を添加源とした Cu 添加 MgB<sub>2</sub> 線材の微細構造 Microstructure in Cu added MgB<sub>2</sub> wire using Mg<sub>2</sub>Cu compound as an Additional Source Material

久保田 雄貴, 嶋田 雄介, 波多 聡, 池田 賢一, 中島 英治(九州大学); 菱沼良光(核融合科学研究所)  
Kubota Yuuki, Shimada Yusuke, Hata Satoshi, Ikeda Ken-ichi, Nakashima Hideharu (Kyushu University)  
Hishinuma Yoshimitsu (National Institute for Fusion Science)  
E-mail: nk-y-kubota@mms.kyushu-u.ac.jp

### 1. はじめに

MgB<sub>2</sub>は、誘導放射能の減衰時間が極めて短い超伝導物質であり、核融合炉における磁場補正等の炉心プラズマ近傍でのコイル応用が期待されている。一般的にMgB<sub>2</sub>コイルの作製では線材をコイル状に巻いた後にMgB<sub>2</sub>を生成させるプロセス(Wind and React)が考えられており、その際、低温熱処理による良質なMgB<sub>2</sub>相の生成は大変有利である。近年、原料としてMg<sub>2</sub>Cuを添加することにより、MgとBのみの場合よりも100°C以上低い475°C程度で200h熱処理することで、高い超伝導特性を示すMgB<sub>2</sub>が得られた<sup>(1)</sup>。本研究では、Mg<sub>2</sub>Cuを添加したMgB<sub>2</sub>線材の微細構造を観察し、MgB<sub>2</sub>の生成過程を明らかにすることを目的とした。

### 2. 試料作製および実験方法

Mg粉末(99.9%、粒径約100μm)、アモルファスB粉末(99.9%、粒径約2~3μm)及びMg<sub>2</sub>Cu粉末(粒径約1μm)を、組成比[1-2x] Mg : x Mg<sub>2</sub>Cu : [2-x] B (x = 0.01~0.15)の割合で混合した。混合粉末をTaシースに詰め、溝ロールを用いて長尺化し、Ar雰囲気の下475°Cで種々の時間熱処理を行いMgB<sub>2</sub>線材を得た。走査電子顕微鏡(SEM/EDS)で線材全体の組織を観察した後、集束イオンビーム(FIB)マイクロサンプリング法により薄膜試料を作製し、透過電子顕微鏡(TEM/STEM/EDS)観察を行った。

### 3. 結果および考察

Fig. 1に未熱処理材(a)、10h熱処理材(b)、200h熱処理材(c)におけるSEM観察結果を示す。これより、Mg<sub>2</sub>Cuの大部分は10hで分解していることが分かる。Fig. 2に、200h熱処理材のSTEM-EDS観察結果を示す。生成したMgB<sub>2</sub>結晶は(001)面にファセット化した大きさ10~250nmの板状であり、MgB<sub>2</sub>結晶(暗い領域)を囲むように微細なMg-Cu化合物(明るい領域)が分布していることが分かった。ファセット化したMgB<sub>2</sub>結晶の形態は、Mgの融点650°C以上でMgとBを反応させた時のMgB<sub>2</sub>の形態と類似している。これは、MgとMg<sub>2</sub>Cuが共晶温度の485°C近傍で熔融し、その液相とBが反応してMgB<sub>2</sub>結晶が生成したことを示唆している。

観察されるMg-Cu化合物相は、10h熱処理材ではMg<sub>2</sub>Cuが、200h熱処理材ではCu<sub>2</sub>Mgが主であった。MgB<sub>2</sub>に接する微細なMg-Cu化合物はMgB<sub>2</sub>(001)面と方位関係を有していた。MgB<sub>2</sub>(001)面には、Mg原子が正六角形配置をとる原子面がある。これらはMg<sub>2</sub>Cu(001)面とCu<sub>2</sub>Mg(111)面におけるMg原子配置と類似しており、整合性の良い界面を形成することが可能と考えられる。MgB<sub>2</sub>の融点(1300°C)が圧倒的に高いことを考慮すると、MgB<sub>2</sub>と方位関係をもつ2つのMg-Cu化合物は、先に生成したMgB<sub>2</sub>を核生成サイトとして生成した可能性がある。10h熱処理材では、未反応のMgがMg-Cu液相中に多量に存在するため、MgリッチのMg<sub>2</sub>Cuが生成されやすく、200h熱処理材では液相中のMgがBとの反応で減少しているため、CuリッチのCu<sub>2</sub>Mg結晶が生成されやすくなると考えられる。

以上の結果から明らかなように、MgとMg<sub>2</sub>Cuが共晶温度近傍で熔融し、その液相とBが反応することでMgB<sub>2</sub>は生成する。さらに、冷却の際、液相の組成に依存したMg-Cu化合物が、MgB<sub>2</sub>を核生成サイトとして生成すると考えられる。

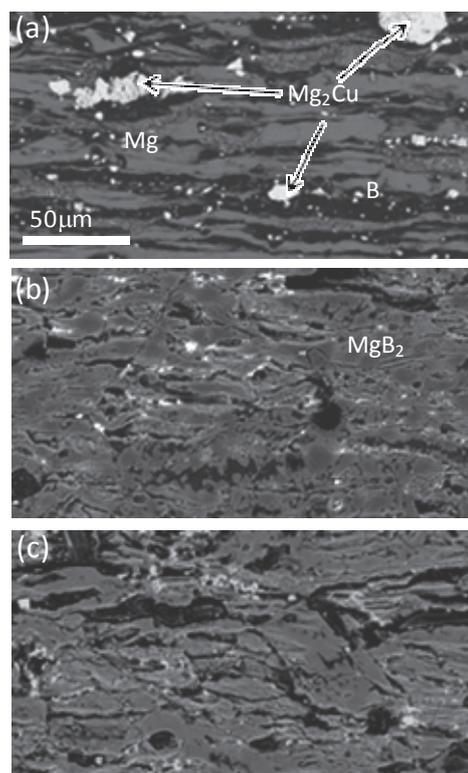


Fig.1. SEM images of MgB<sub>2</sub> wire (a)before heat treatment, prepared via 475°C heat treatment for (b) 10h and (c) 200h.

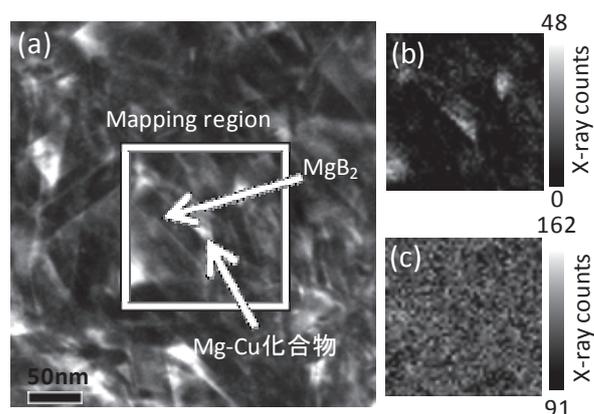


Fig.2. STEM-EDXS elemental mapping for a MgB<sub>2</sub> wire prepared via 475°C heat treatment for 200h. (a) STEM dark-field image, (b) Cu map and (c) Mg map.

### 参考文献

- (1) Hishinuma *et al.*: Supercond. Sci. Technol., 20 (2007), 1178-1183.

# SiCドーピングしたMgB<sub>2</sub>線材の臨界電流密度に及ぼす圧延による効果

## Effect by rolling on critical current density of SiC doped MgB<sub>2</sub> wire

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); 田中 和英, 和久田 毅(日立)

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

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

YANAGI Nagato, MITO Toshiyuki (NIFS); TANAKA Kazuhide, WAKUDA Tsuyoshi (Hitachi, Ltd.)

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

### 1. はじめに

MgB<sub>2</sub>は金属系超電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 MgB<sub>2</sub> 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大きくなることも明らかにした[1]。今回は、高磁界領域で優れた  $J_c$  特性が得られる SiC ドープの MgB<sub>2</sub> 線材について、同様な圧延効果が見られるかを調べた。

### 2. 実験

線材全体が直径 0.8 mm の MgB<sub>2</sub> の丸線材(Wire)を線材全体のアスペクト比が 6、10 になるように圧延し、それぞれを Tape6、Tape10 とした。MgB<sub>2</sub> のフィラメントのサイズ及びアスペクト比を Table 1 に示す。なお、それぞれの線材の臨界温度は同程度だった。テープ面に対して平行方向に磁界を加えたときを EO、垂直方向に磁界を加えたときを FO としている。 $J_c$ - $B$  特性は SQUID 磁力計を用いた直流磁化法から評価した。

Table 1 : Specifications of superconducting filament in each specimen.

speciment	filament size [mm]	Aspect ratio
Wire	$\phi$ 0.421	-
Tape6	1.238×0.116	10.7
Tape10	1.476×0.097	15.2

### 3. 結果及び検討

Fig.1 に 4.2 K と 25 K の  $J_c$ - $B$  特性を示す。圧延した線材は丸線材に比べ、 $J_c$  が向上し、FO よりも EO の方が  $J_c$  が高いことが分かる。また、今回は Tape6 で一番大きな  $J_c$  が得られた。これは、圧延によって新たな欠陥が生成されたことによる、 $B_{c2}$  の向上とピン力密度の向上だと考えられる。また、MgB<sub>2</sub> の単結晶に異方性があることから、圧延によって結晶の配向度の向上も考えられる。

Fig.2 に丸線材の  $J_c$  (1 T) で規格化した  $J_c$  とフィラメントのアスペクト比の関係を示す。なお、比較のためにノンドープ MgB<sub>2</sub> 線材の結果も示す。フィラメントのアスペクト比の増加に伴って、 $J_c/J_c$  (1 T) も大きく増加している。

この増加は SiC ドープした MgB<sub>2</sub> 線材の方が大きい。また、SiC ドープした MgB<sub>2</sub> の Tape6 では  $J_c$  が上昇しているが、Tape10 では減少している。詳細な議論は当日行う。

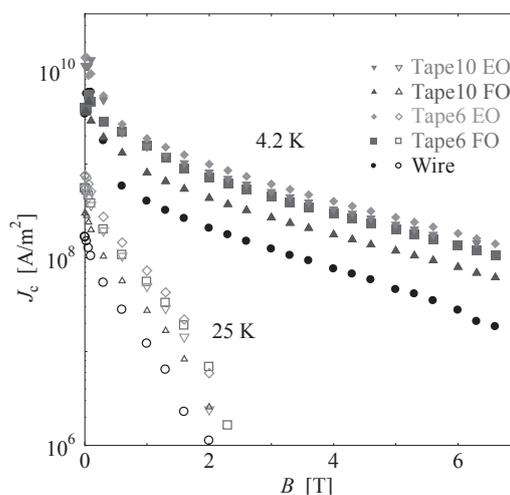


Fig. 1.  $J_c$ - $B$  properties at 4.2K and 25K.

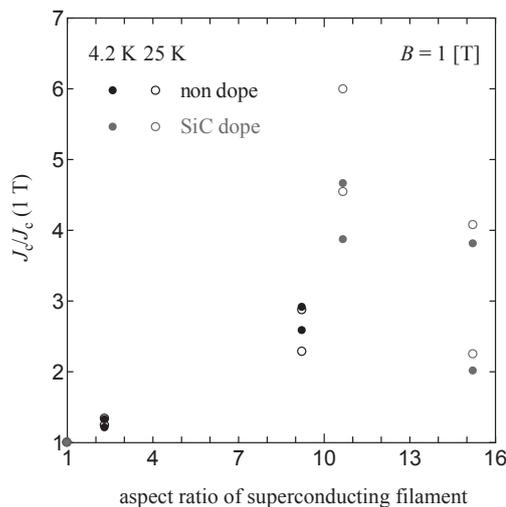


Fig. 2. Aspect ratio vs.  $J_c$  normalized by  $J_c$  (1 T) of wire at 4.2K and 25K.

### 参考文献

- [1] J. Tanigawa, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 82 (2010) p.160

# Al テープ基板上に作製した MgB<sub>2</sub> 超伝導薄膜の輸送特性

## Transport properties of MgB<sub>2</sub> superconducting thin films on Al tape substrates

米倉 健志, 藤吉 孝則, 末吉 哲郎(熊本大学); 土井 俊哉(京都大学); 吉原 和樹(鹿児島大学)  
淡路 智, 渡辺 和雄(東北大学)

YONEKURA Kenji, FUJIYOSHI Takanori, SUEYOSHI Tetsuro (Kumamoto Univ.); DOI Toshiya (Kyoto Univ.);  
YOSHIHARA Kazuki (Kagoshima Univ.); AWAJI Satoshi, WATANABE Kazuo (Tohoku Univ.)

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

### 1. はじめに

MgB<sub>2</sub> 超伝導体は、金属系超伝導体の中で最高の臨界温度  $T_c=39\text{K}$  を有しており、液体水素や冷凍機で容易に冷却可能であることから、その実用化に期待が持たれている。しかし、現在主流な作製方法である Powder In Tube 法による MgB<sub>2</sub> 超伝導線材では、大きな臨界電流密度  $J_c$  が得られておらず、また磁界中の  $J_c$  の減少も大きい。MgB<sub>2</sub> 薄膜では高い  $J_c$  が得られているため、線材加工しやすい金属基板上に MgB<sub>2</sub> 薄膜を作製することで新たな MgB<sub>2</sub> テープ線材作製が期待される。

本研究では、低温成膜の一種で比較的高い  $T_c$  が得られる電子ビーム蒸着法(EBE 法)[1]を用いて Al 基板上に MgB<sub>2</sub> 薄膜を作製し、 $J_c$  の磁場依存性、磁場角度依存性を測定し評価した。

### 2. 実験

EBE 法を用いて Al 基板上に MgB<sub>2</sub> 薄膜を作製した。作製した MgB<sub>2</sub> 薄膜のそれぞれの作製条件および  $T_c$  を Table 1 に示す。全ての試料の膜厚は 250nm である。全ての試料の組成比は、B が過剰で作製しており、Al50 のみ B バッファ層を堆積させている。これは、組成比が B 過剰の場合、高磁場で高い  $J_c$  が得られているからである[2]。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  $1\mu\text{V}/\text{cm}$  として  $J_c$  を決定した。また、 $J_c$  の磁場依存性、磁場角度依存性をそれぞれ評価した。

### 3. 実験結果

Fig.1 に  $T=10\text{K}$  における MgB<sub>2</sub> 薄膜の  $J_c$ - $B$  特性を示す。磁場は  $c$  軸と平行な方向に印加しており、Al39 と Al50 は 10T まで測定している。自己磁場の  $J_c$  は、最も高い Al50 で  $9.45 \times 10^{10} \text{A}/\text{m}^2$  と高い値を示した。また、Al50 は磁場中でも最も高い  $J_c$  を示したが、7.5T 以上の磁場中では急激に  $J_c$  が低下した。このことから、Al50 には低磁場では強いピンニング力を持つが、高磁場では、急激にその作用が弱くなるピンニングセンターが存在すると推測される。

Fig.2 に  $T=10\text{K}$ ,  $B=3\text{T}$  での  $J_c$ - $\theta$  特性を示す。印加磁場角度は  $\theta=0^\circ$  で  $B//c$ ,  $\theta=90^\circ$  で  $B \perp c$  となっている。 $\theta=90^\circ$  では、ピー

クはほとんど見られない。このことから、Al 基板上に作製した MgB<sub>2</sub> 薄膜は、単結晶基板上に作製した MgB<sub>2</sub> 薄膜に比べ、結晶性があまり良くないことがわかる。一方、全ての試料において  $\theta=0^\circ$  付近でブロードで大きなピークを有していることがわかる。このことは全ての試料に  $c$  軸相関ピンが存在していることを示している。これまで EBE 法で作製した MgB<sub>2</sub> 薄膜では主要なピンニングセンターとして結晶粒界が作用していることから[3,4]、この  $c$  軸相関ピンは結晶粒界であると考えられる。発表では、さらに巨視的ピン力密度の磁場依存性などから作製した MgB<sub>2</sub> 薄膜のピンニング特性を考察する予定である。

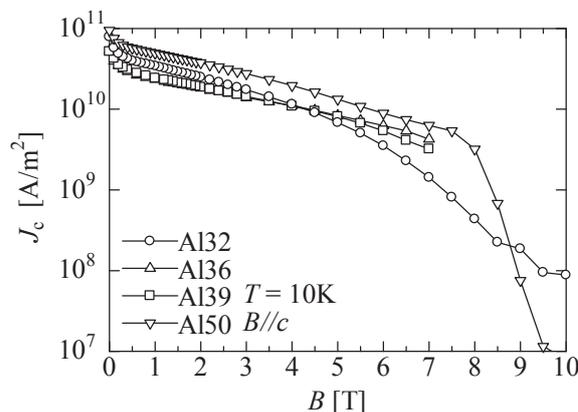


Fig.1 Magnetic field dependence of  $J_c$  at 10K for  $B//c$

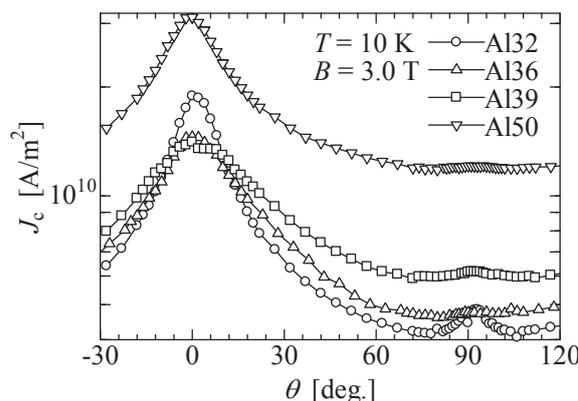


Fig.2 Field angular dependence of  $J_c$  at 10K for 3T

Table1 MgB<sub>2</sub> samples

試料名	成膜温度	組成比 Mg : B	$T_c$	バッファ層
Al32	280°C	1 : 2.25	25.1K	
Al36	250°C	1 : 2.18	24.3K	
Al39	265°C	1 : 2.24	31.5K	
Al50	280°C	1 : 2.18	31.6K	B

### 参考文献

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

## 低温領域における MgB<sub>2</sub>バルクの磁束ピンニング特性 Pinning properties of MgB<sub>2</sub> bulks at low temperature regions

木内 勝, 松下 照男(九工大); 山本 明保(東大); 淡路 智, 渡辺 和雄(東北大・金研);  
 KIUCHI Masaru, MATSUSHITA Teruo (Kyushu Inst. of Tech.); YAMAMOTO Akiyasu (Univ. of Tokyo)  
 AWAJI Satoshi, WATANABE Kazuo (Tohoku Univ.);  
 E-mail: kiuchi@cse.kyutech.ac.jp

### 1. はじめに

MgB<sub>2</sub>の臨界電流密度特性は作製手法や不純物添加などにより大きく変化させることができ、特に高磁界領域の臨界電流密度特性向上には適度なC添加が有効であり、B<sub>4</sub>CやSiCの添加は優れた臨界電流特性を示す。これはBの一部をC置換しMgB<sub>2</sub>結晶にひずみを与え、結晶を歪ませることによりコヒーレンス長が減少し、結果的に上部臨界磁界B<sub>c2</sub>が増加するためである。さらに、このひずみは磁束ピンニングにも影響を与えることから、臨界電流密度特性向上はこれらの2つの寄与によるものと考えられる。また、MgB<sub>2</sub>はマルチギャップであるために、高温度領域と4.2 K近傍の低温度領域で磁束ピンニング機構が異なる可能性がある[1]。したがって本研究では、C添加したMgB<sub>2</sub>の低温度、高磁界領域に注目し、C添加効果やB<sub>c2</sub>等が磁束ピンニング特性にどのように影響を与えるのかを調べた。

### 2. 実験

試料はシーす材としてSUS316管を用いて、端部を閉じるPICT (Powder-In-Closed-Tube) 法で作製されたMgB<sub>2</sub>バルク体で[2]、特性評価の際はシーすを取り除いた。今回はB<sub>4</sub>CとSiCを添加した2つのMgB<sub>2</sub>を用いた。2つの試料の熱処理条件とSQUID磁力計を用いた臨界温度T<sub>c</sub>をTable 1に示す。また、臨界電流密度特性評価は東北大学強磁場超伝導材料研究センターで行った。臨界電流密度は超電導マグネット(18T-SM)と引き抜き磁化測定装置を用いた直流磁化測定から求めた。また上部臨界磁界B<sub>c2</sub>(T)は20T-SMを用いて、磁界中の抵抗率測定から求めた。

Table 1: Specification of specimens.

Specimen	Composition	sintering condition	T <sub>c</sub> [K]
#1	MgB <sub>1.5</sub> (B <sub>4</sub> C) <sub>0.10</sub>	850°C, 3h	35.4
#2	MgB <sub>1.8</sub> (SiC) <sub>0.20</sub>	850°C, 3h	35.5

### 3. 結果及び検討

Fig. 1に磁化測定から求めた臨界電流密度J<sub>c</sub>のピン力密度F<sub>p</sub>のスケール則を示す。縦軸はピン力密度の最大値F<sub>pmax</sub>で、横軸はピン力密度がゼロとなる磁界である不可逆磁界B<sub>i</sub>で規格化した。20 K近傍においては、2つの試料とも大まかに一つの曲線にスケールする[1]。しかし温度の低下と共に磁束ピンニング特性が変化し、20Kでピン力密度は最規格化磁界b(=B/B<sub>i</sub>)=0.19で最大となるが、4.2 Kではb=0.11となる。更にこの傾向は#2ではより顕著で、20 Kはb=0.19で最大であるが、4.2 Kではb=0.092となる。これらの結果からC添加でも温度領域により磁束ピンニング特性が異なっていることがわかる。

Fig. 2に40 Kの抵抗の値の90%となる温度で定義した上部臨界磁界B<sub>c2</sub>(T)、10%となる温度で定義した不可逆磁界B<sub>i</sub>'(T)の温度依存性を示す。また、図中にはそれぞれの試料の遷移幅ΔT<sub>c</sub>の磁界依存性を示す。この結果から比較的高い温度領域においては#2の方がB<sub>c2</sub>とB<sub>i</sub>'は大きいことがわかる。一方で20 Kより低い温度領域になると、#2のB<sub>i</sub>'はB<sub>c2</sub>から離れていく傾向がある。これは、遷移幅

ΔT<sub>c</sub>の磁界依存性においても同様で、#1に比べて#2の磁界依存性が大きくなっており、B<sub>i</sub>'が大きく減少していることがわかる。詳細な議論は発表当日行う。

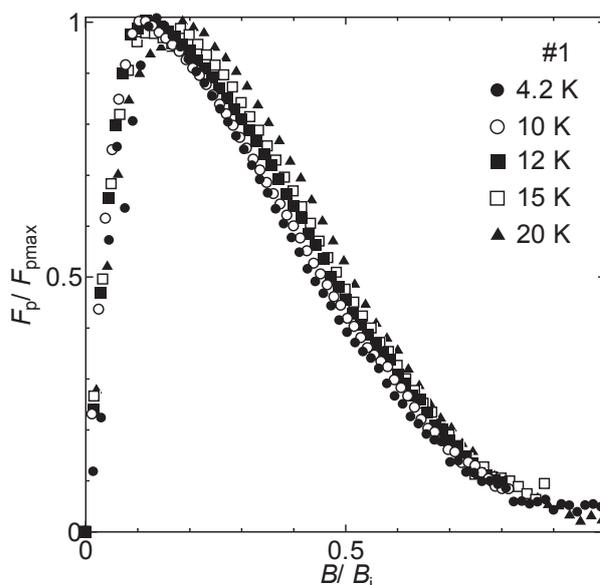


Fig. 1 Scaling law of pinning-force density of specimen #1.

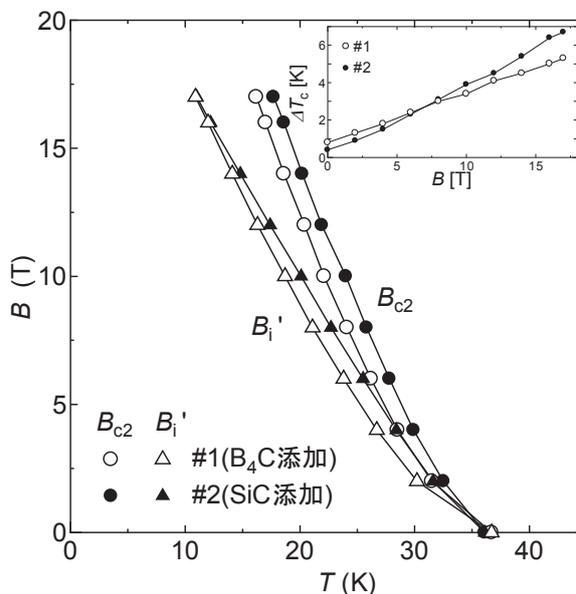


Fig. 2 Temperature Dependence of B<sub>c2</sub> and B<sub>i</sub>'. Inset shows the magnetic field dependence of ΔT<sub>c</sub>.

### 参考文献

1. M.Kiuchi et al.: *Physica C* **445** (2006) 474.
2. A. Yamamoto et al.: *SuST* **17** (2004) 921.

# 実用 RE123 線材のコイル化の検討

The coil of RE123 coated conductor

本間 久雄, 山田 穰, 山田 雄一, 大熊 武, 和泉 輝郎 (ISTEC)

HOMMA Hisao, YAMADA Yutaka, YAMADA Yuichi, OHKUMA Takeshi, IZUMI Teruo (ISTEC);

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

## 1. はじめに

RE123 系線材の機器応用には、高臨界電流 ( $I_c$ ) が見込める冷凍機冷却による 20~60K 運転が想定される。こうした冷凍機伝導冷却でのコイルのクエンチ過程を調べることは今後の機器設計上重要である。前回[1]、50m 級 RE123 線材を用いた円形パンケーキコイルで安定性評価を行い、常電導転移に至る熱暴走挙動を調べた。今回は、SMES、回転器、モータ等での広い応用が考えられる円形でないレーストラック形状のコイルを作製し、その  $I_c$  特性、安定性、熱暴走挙動を調べた。

## 2. 試料及び評価方法

1) 線材は、ISTEC 製 IBAD-PLD 線材を使用した。線は 5mm 幅にレーザで切断し、厚さ 30  $\mu$ m の Cu メッキを施した。 $I_c$  (@77K, s. f.) は、430~460A/cm 幅である。

2) コイル試験：上記の 100m 長線材により、外周部で径 162mm  $\times$  直線部長 312mm のレーストラックコイルをエポキシ含浸して作製した。巻き数は 140 ターンで、径方向の厚みは約 40mm である。コイル上面に冷却板を配置し、GM 冷凍機の伝導冷却で 30~60K に保持し、コイルの  $I_c$ 、熱暴走電流  $I_{tr}$  [2] を測定した。また、熱暴走を詳細に観測するためコイル内部には電圧端子を約 20 ターン毎にとった。 $I_{tr}$  は通電電流を一定時間保持してコイル両端電圧  $V_c$  が上昇する電流とした。なお、77K のコイルの  $I_c$  (0.1  $\mu$ V/cm 定義、77K, s. f.) は 95.8A / 5mm 幅であった。

また、安定性評価のため、コイルから切り出したエポキシ+線材複合体の熱伝導も調べた。

## 3. 結果

Fig. 1 に 100m 級線材を使ったコイルの 30~60K の  $I_c$  を示す (定義は、0.1  $\mu$ V/cm)。60K では 245A/5mm 幅、50K では 293A/5mm 幅で  $n$  値も各 28、26 と高い値を示した。さらに温度を下げると、低電界からの外装値で 40K では >500A/5mm 幅、30K だと >2000A/5mm 幅以上の非常に高い値が見込まれた。すなわち、今後の RE 系線材を使った冷凍機冷却による機器応用では、かなりの大電流での通電が使用、設計できる。

次に、Fig. 2 に 60K における同コイルの熱暴走試験結果を示す。横軸に経過時間を、縦軸に通電電流  $I$  とコイルの発生電圧  $V_c$  を取った。通電電流  $I$  を徐々に増やしていき、かつ、一定時間保持して電圧上昇の時間変化を見た。Fig. 2 に示すように、193A までは全体コイル電圧  $V_c$  は安定しているが、それ以上 (ここでは、193.1A) になると、Fig. 2 の “A” に示すように一定電流を保持しておいても、 $V_c$  が上昇していき、熱暴走に至った。この時のコイル両端電圧  $V_c$  は 1.4mV で線材長で単純に平均化した電界 0.07  $\mu$ V/cm であり、低い電界で熱暴走が発生することがわかった。

さらに、熱暴走箇所を詳細に調べるため、各コイル内電圧を観測した。その結果、Fig. 2 に示すように、 $I_c$  の低い上側コイルで、かつ磁場の高い内層部の 1~20 ターン間  $V_{(1-20)}$  で大きな電圧発生が最初に生じていた。この時の発生電圧  $V_{(1-20)}$  は 1.1mV であった。すなわち、この値はほぼ全体の電圧  $V_c$  を担っており、熱暴走は、磁場の高い、すなわち  $I_c$  の低い内層部から起こっていることがわかった。

熱伝導の要素試験では、構成材のエポキシ、絶縁材、線材材料の各構成による計算値と複合体試験片での実験値を比較したが、両者に大きな差が見られた。すなわち、熱設計、安定性評価においては、理想的な接触状態ではなく、実際の作製に即したデータを用いないといけないことも分かった。熱伝導度、システム構成、熱設計の検討詳細は当日発表する。

## 4. まとめ

高  $I_c$  の RE123 系線材によるレーストラック形状コイルの  $I_c$  特性、熱暴走特性試験を行い、以下ことがわかった。

- 1) 本形状でも、30K~60K で 2000A~200A/5mm 幅の高  $I_c$  の通電が期待できる。また、 $n$  値も約 30 の高い値であった。
- 2) 熱暴走試験を 60K で行ったが、通常の線材  $I_c$  の定義より低い 0.1  $\mu$ V/cm の電圧で  $I_c$  の低いコイル内層部から起こっていることがわかった。

## 謝辞

(株) 東芝の小柳氏にはコイルの試作・評価をして頂き、感謝致します。本研究は、「イットリウム系超電導電力機器技術開発プロジェクト」の一部として NEDO の委託により実施したものである。

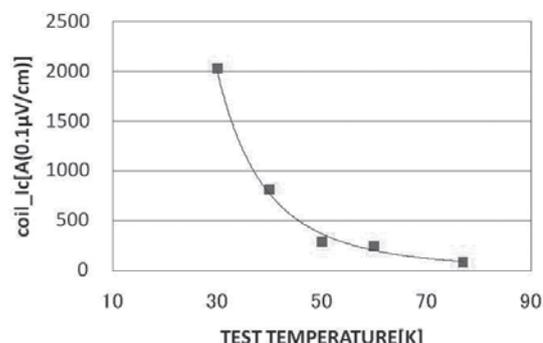


Fig. 1 Temperature dependence of Coil  $I_c$

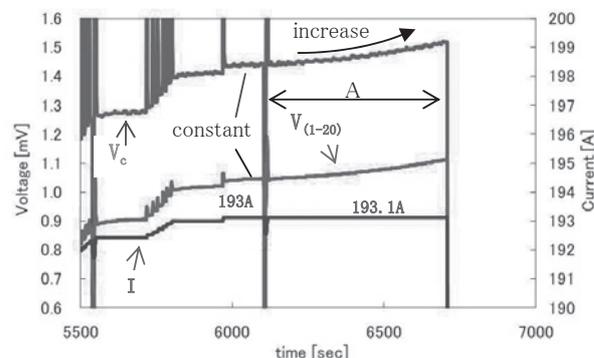


Fig. 2 Thermal-runaway test at 60K by refrigerator cooling

## 参考文献:

- [1] H. Homma, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 82 (2010) p.153
- [2] 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.

## YBCO 薄膜線材の比熱と熱拡散率

## Specific heat and thermal diffusivity of YBCO coated conductor

内藤 智之、荒屋敷 貴大、藤代 博之(岩手大); 山村 泰久、齋藤 一弥(筑波大学);  
 岡元 洋、林 秀美(九州電力); 五所 嘉宏、大熊 武、塩原 融 (ISTEC)  
 NAITO Tomoyuki, ARAYASHIKI Takahiro, FUJISHIRO Hiroyuki (Iwate Univ.);  
 YAMAMURA Yasuhisa, SAITO Kazuya (Univ. of Tsukuba);  
 OKAMOTO Hiroshi, HAYASHI Hidemi (Kyushu Electric Power Co.);  
 GOSHO Yoshihiro, OHKUMA Takeshi, SHIOHARA Yuh (ISTEC)  
 E-mail: tnaito@iwate-u.ac.jp

## 1. はじめに

超電導機器の設計において熱的安定性の評価は不可欠である。YBCO線材は基板、バッファー層、YBCO層および安定化Ag層からなる多層構造を有することから熱物性の振る舞いは単純ではない。我々は前々回の学会でAg層厚が異なる3種類のYBCO線材の熱伝導率について報告した[1]。今回はYBCO線材の比熱と測定した比熱と熱伝導率から見積もった熱拡散率を報告する。

## 2. 実験方法

YBCO線材はIBAD-PLD法により(株)フジクラで作製された。YBCO線材は Hastelloy 基板 (厚さ100 $\mu\text{m}$ )、バッファー層 (1.7 $\mu\text{m}$ )、YBCO層 (約1.5 $\mu\text{m}$ ) および Ag層 (厚さ20 $\mu\text{m}$ ) で構成されている。このサンプルをYCC-Ag20と呼ぶ。厚さ300 $\mu\text{m}$ のCu板を貼り付けたYBCO線材 (Ag層厚は10 $\mu\text{m}$ )をYCC-Ag10Cu300と呼ぶ。また、Hastelloy基板上にバッファー層を蒸着したサンプル(Hastelloy+buffer)を用意した。比熱はPPMS (Quantum Design社)を用いて熱緩和法で測定した。

## 3. 実験結果および考察

Fig.1にYCC-Ag20、YCC-Ag10Cu300および基板+バッファー層の比熱の温度依存性を示す。3者の温度依存性はほぼ同様であるが絶対値がわずかに異なる。Hastelloy+bufferの比熱はHastelloyの文献値[2]とほぼ一致した。

YCC-Ag20の比熱を各層の比熱(文献値)を用いて再現することを試みた。HastelloyとAgの密度はそれぞれ8.89 g/cm<sup>3</sup>および10.49 g/cm<sup>3</sup>とほぼ等しく、バッファー層とYBCO層は他の層に比べて非常に薄いことからそれらの寄与は無視できると仮定した。このとき、YCC-Ag20の比熱 $C(\text{YCC-Ag20})$ は次式で見積もられる。

$$C(\text{YCC-Ag20}) =$$

$$(100/120) \times C(\text{Hastelloy}) + (20/120) \times C(\text{Ag})$$

ここで、 $C(\text{Hastelloy})$ と $C(\text{Ag})$ はそれぞれHastelloyとAgの比熱を表す。Fig.2にその結果を示す。文献の $C(\text{Hastelloy})$ [2]と $C(\text{Ag})$ [3]を用いて推定したYBCO線材の比熱の値は測定値と良い一致を示した。また、YCC-Ag10Cu300についても同様の結果が得られた。従って、YBCO線材の比熱は実測しなくとも文献値を用いて推定することが可能であることが示された。熱拡散率については講演当日に紹介する。

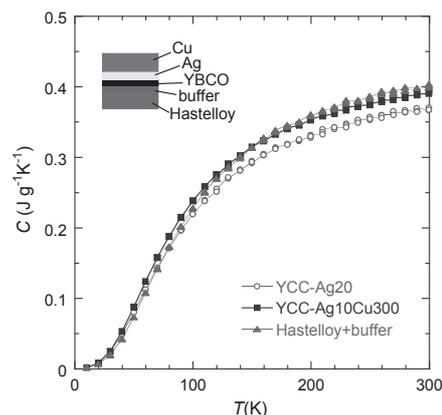


Fig.1 Temperature dependence of the specific heat  $C(T)$  of YBCO coated conductors (YCCs) and buffer layer deposited on Hastelloy substrate.

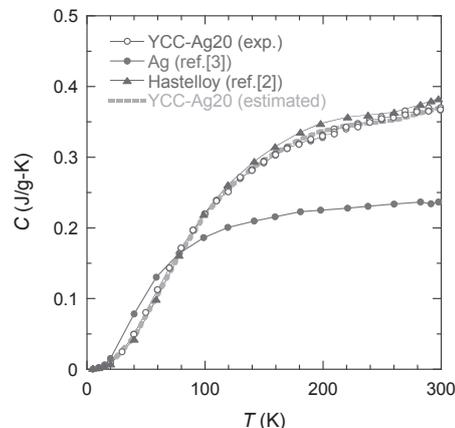


Fig.2 Measured and estimated  $C(T)$  of YCC-Ag20 and the reported  $C(T)$  of Ag and Hastelloy.

## 参考文献

- [1] T. Naito *et al.*: Abstracts of CSJ Conference **82** (2010) p.1
- [2] J. Lu *et al.*: J. Appl. Phys. **103** (2008) 064908
- [3] "Thermophysical Properties of Matter - The TPRC Data Series. Vol. 4 Specific Heat - Metallic Elements and Alloys", (Ed. Y.S. Touloukian and C.Y. Ho) IFI/PLENUM, New York-Washington, 1970

## 謝辞

本研究は、経済産業省プロジェクト「イットリウム系超電導電力機器技術開発(超電導変圧器技術開発)」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。

## フッ素フリーMOD法によるZr添加YBCO膜の合成

## Growth of Zr-Doped YBCO Thin Films by Fluorine-Free MOD Process

梶岡 知彦, 熊谷 俊弥(産総研, 千工大); 松井 浩明, 真部 高明(産総研); 五十嵐 香(千工大)

KAJIOKA Tomohiko, KUMAGAI Toshiya (AIST, CIT); MATSUI Hiroaki, MANABE Takaaki (AIST); IGARASHI Kaoru (CIT)

## 1. はじめに

YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> (YBCO) は、磁場中で比較的高い臨界電流密度  $J_c$  が得られることから、超電導応用における有力な物質である。しかし、膜厚の向上とともに  $J_c$  が低下するという問題があり、これを解決する手段として、 $J_c$  を決定する要因の一つである磁束ピン止め力を強化する研究が行われている。これまで、フッ素を含むトリフルオロアセテート(TFA)を原料とした塗布熱分解(MOD)法を用いた合成プロセスにおいて、BaZrO<sub>3</sub> ナノ粒子を膜中に導入し、 $J_c$  が向上したという報告がある[1]。本研究では、合成時にフッ化水素を発生しないフッ素フリーMOD法によって作製されるYBCO膜に、Zrをドーブし、 $J_c$  を向上させることを目指して実験を行った。

## 2. 実験方法

フッ素フリーY-Ba-Cu溶液は、酢酸塩を出発原料とする文献[2]と同様の方法で作製した。Zr添加は、原料粉末を混合する段階で、酢酸ジルコニウムを加えることでおこなった。Zr添加溶液は、Yに対してZrのモル率が1%となるように調製した。YBCOのエピタキシャル成長を阻害することなくZrを導入するために、Fig. 1に示すようなZr添加層と非添加層が交互に積層した多層仮焼成膜を作製した。Zr添加層厚を変化させることで、膜中の実効的なZr濃度を調節した。基板はLaAlO<sub>3</sub>(LAO)を用いた。塗布および仮焼成にはスピコート、マッフル炉を用い、本焼成には酸素分圧を制御した精密管状電気炉を用いた。膜厚は約500nmに設定した。

## 3. 結果および考察

Fig. 2に、 $\theta$ -2 $\theta$ X線回折測定におけるYBCO 007ピークの強度、および誘導法により測定した $J_c$ の、Zr添加層厚依存性を示す。YBCOの配向性はZr添加層厚の増加とともに単調に低下した。一方で $J_c$ はZr非添加の試料では1.6 MA/cm<sup>2</sup>であったが、Zr添加層厚の増大とともに $J_c$ が増加し添加層厚約30nmで3.8 MA/cm<sup>2</sup>となった。さらにZr添加層厚を増大

させると、 $J_c$ は低下した。観測されたZr添加層厚約30nmにおける $J_c$ の極大は、YBCOの配向性では説明できない。よって本研究から、フッ素フリーMOD法で作製したYBCO膜においても、Zrドーブが磁束ピン止め力の強化に有効である可能性が示唆された。

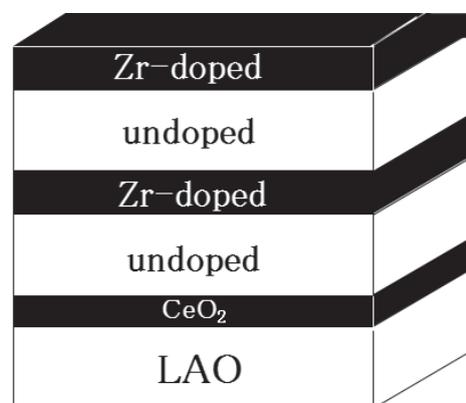


Fig. 1 Schematic view of the Zr-doped/undoped multi-layer structure of the YBCO precursor films.

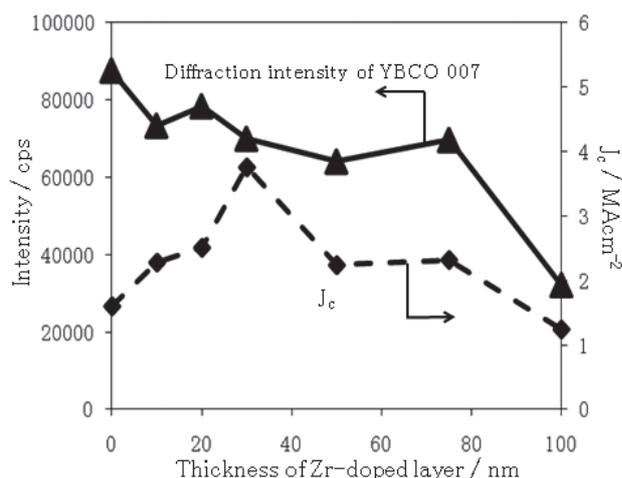


Fig. 2 Dependence of XRD intensity of YBCO 007 and of  $J_c$  on the thickness of Zr-doped layer.

## 参考文献

1. M. Miura et al.: Appl. Phys. Exp., Vol. 1 (2008) p.051701.
2. T. Kumagai et al.: Surf. Tech., Vol. 42 (1991) p.500-506.

## 二層多角形配置 YBCO 集合導体の外層と内層の電流バランスによる 交流損失特性への影響

Influence of AC transport current balance on AC loss  
in two layered polygonal YBCO assembled conductor

春日 瑛祐, 田村 昭洋, 小川 純, 福井 聡, 岡 徹夫, 佐藤 孝雄(新潟大学)

KASUGA Eisuke, TAMURA Akihiro, OGAWA Jun, FUKUI Satoshi, OKA Tetsuo, Sato Takao (Niigata University)

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

### 1. はじめに

高温超伝導ケーブルの開発において交流通電時に生じる交流損失の特性を評価することが、超伝導ケーブルの性能向上のため必要である。我々の研究グループでは、単層多角形配置 YBCO 集合導体の交流損失低減効果を実験により確認した。本研究ではこれをさらに発展させ、積層したときに高温超伝導集合導体の内外層に流れる電流のバランスが交流損失特性に与える影響について評価・検討することを目的としている。そのため、二層六角形配置 YBCO 集合導体を作製し、実験により評価を行った。

### 2. 測定サンプルの構成および実験方法

図 1 に二層六角形配置 YBCO 集合導体の断面を示す。図に示すように、六角形状の GFRP の表面に線材間距離を 0.5mm として YBCO 線材を固定し、この表面に厚さ 1.2mm の GFRP を重ね、その上に外層の YBCO 線材を配置した。図 2 のように内外層それぞれの YBCO 線材表面にスパイラル電圧リードループを測定区間を 50mm として配置し、四端子法により交流通電損失の測定を行った。集合導体の通電方法は、各線材にそれぞれ通電する単独通電(Single)・すべての線材を直列接続し同方向に通電した並列通電(Parallel)・内外層の電流を交互に通電した交互通電(Anti-Parallel)とし、このときの交流損失の評価を行った。さらに 2 電源を用いて内層と外層の電流バランスを変化させたときの交流通電損失特性の評価を行った。

### 3. 測定結果と考察

図 3 に単独・並列・交互通電時の YBCO 集合導体に生

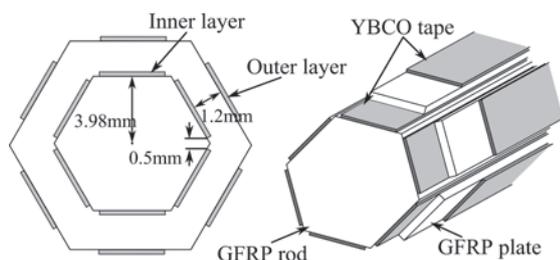


Fig.1 Arrangement of two layered YBCO hexagonal assembled conductor.

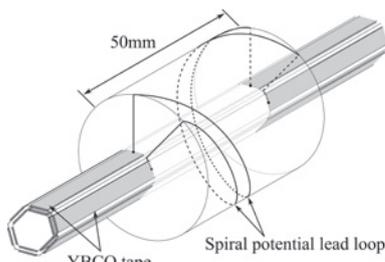


Fig.2 Schematic illustration of two layered YBCO hexagonal assembled conductor with attached spiral voltage potential lead loop.

じる交流損失を示す。縦軸は集合導体全体の交流損失、横軸は通電電流の波高値を示している。単独通電時と比較し直列通電時には交流損失が増加、交互通電時には減少しており、隣接線材が作る磁界の影響を受けて交流損失特性が変化していることがわかる。

図 4 に内外層の電流バランスを変化させたときの集合導体全体に生じる交流損失を示す。縦軸は集合導体全体の交流損失を、横軸は内層と外層に流れる電流の比率を示している。図 4 より、内層に流れる電流が集合導体全体に流れる電流の 54~58%の時に交流損失が最小になっている。これは、外層線材は内層が作る磁界の影響を受けるが、内層の線材は外層の磁界の影響を受けないため、外層と内層に同電流を流すと外層の線材に生じる損失が大きくなるためである。これは、内層の線材の負荷率を増加し、外層の線材に流れる電流を減らすことにより集合導体全体の損失を効率よく低減することが可能であることを示している。

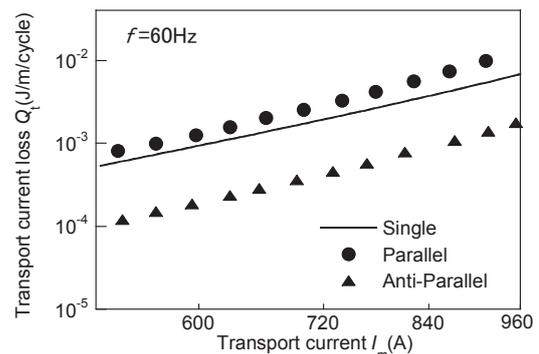


Fig.3 AC transport current loss  $Q_t$  in two layered YBCO hexagonal assembled conductor are plotted for the amplitude of AC transport current  $I_m$  in single, parallel and anti-parallel modes.

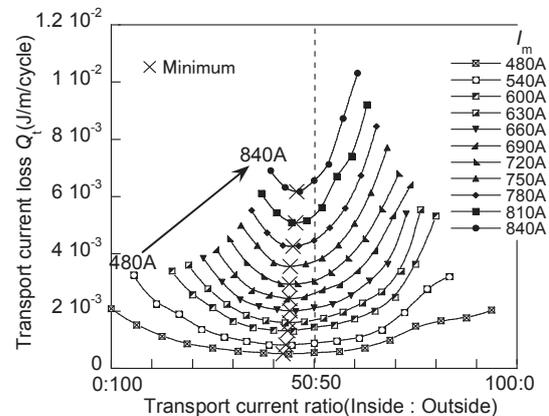


Fig.4 The AC transport current loss  $Q_t$  in two layered YBCO hexagonal assembled conductor are plotted against the balance of the inside and outside transport currents for total transport current  $I_m$ .

# YBCO 線材を多角形配置した集合導体の交流損失特性の測定及び数値解析 Measurement and Numerical Analysis of AC Loss Characteristics of Polygonal Conductor Assembled by YBCO Tapes

七山 淳一, 福井 聡, 伊藤 貴大, 小川 純, 佐藤 孝雄(新潟大学); 塚本 修己(横浜国立大学); 高尾 智明(上智大学)  
 NANAYAMA Junichi, FUKUI Satoshi, TAKAHIRO Ito, OGAWA Jun, SATO Takao (Niigata University);  
 TSUKAMOTO Osami (Yokohama National University); TAKAO Tomoaki (Sophia University)  
 E-mail: fukui@eng.niigata-u.ac.jp

## 1. はじめに

YBCO線材は超伝導層の厚さが極めて小さいので、完全に円形断面のケーブルにすることができれば、交流損失は大幅に減少する。しかしながら、YBCO線材を多層スパイラルケーブルにした場合、断面が円形より多角形に近くなり線材面に垂直な磁界がキャンセルされず、それにより交流損失が下げ止まってしまうことが懸念される。このような電磁現象は隣接線材間のギャップと線材の幅に大きく依存する。本研究では、多角形導体における隣接線材間のギャップと交流損失との関係を測定・数値解析により評価し、それら結果の妥当性を検証した。

## 2. 解析モデル及び測定方法

Fig. 1 にテープ線材を多角形に配置した場合の交流損失解析モデルを示す。導体構造パラメータは幾何学的に以下の関係を満たす。

$$(R_i + d_1 + d_2 / 2) \tan(\pi / N_i) = \frac{g_i}{2 \cos(\pi / N_i)} + \frac{W}{2} \quad (1)$$

ここで、 $N_i$ は線材本数、 $W$ は線材幅、 $g_i$ は第*i*層の線材間ギャップ、 $R_i$ は第*i*層の内接半径、 $d_1$ 、 $d_2$ は線材の基板及び超伝導層の厚さである。ケーブル内部の電流密度・電界の分布を数値解析により求め、ケーブルの交流損失を計算する。解析モデルの詳細は[1]に示されている。

Tab. 1 に測定に使用した YBCO 線材の諸元を示す。測定に使用した線材は Super Power 社製のものである。Fig. 2 に測定に用いたサンプル導体の構造を示す。断面が五角形及び六角形形状の GFRP 製のフォルダ上に線材を固定する。線材間のギャップ 0.2・0.5・1.0・2.0・4.0mm のそれぞれに対応するフォルダを用意する。各線材の同一の電流を流すために、電流リードは独立して接続する。電圧計測のためのスパイラルリードループは全ての線材に取り付けている。各線材に取り付けたスパイラルリードループは、他の全ての線材を取り囲むように配置する。交流電流時の交流損失はロックインアンプを用いた四端

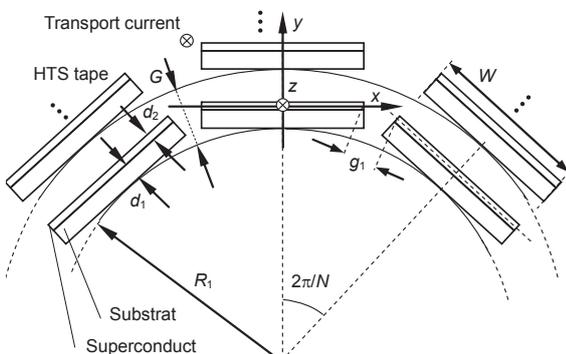


Fig. 1 Numerical model

子法を用いる。Fig. 2 に示すように、交流損失測定時には

Tab. 1 Specifications of YBCO tape

Tape width $W$	4 mm
Thickness of substrate	0.05 mm
Thickness of superconductor	1 $\mu$ m
Thickness of Cu stabilizer	0.04 mm
Thickness of Ag overlayer	2 $\mu$ m

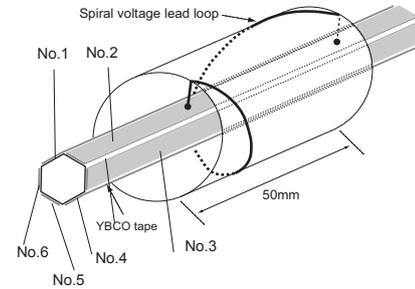


Fig. 2 Sample conductor

サンプル導体の各線材に取り付けたリード線を直列に接続して、各線材の電流値を均一にする。この状態で、各線材のスパイラルリードループの電圧  $V_0$  をロックインアンプを用いて計測して、以下の式から交流損失を求める。

## 3. 測定結果と解析結果の比較・検討

Fig.3に測定及び解析から得られた交流損失特性を示す。線材間ギャップが小さい場合には、交流損失が大幅に減少しており、それが大きくなるとNorrisの理論値（線材単独の損失の本数倍）に近づく。線材間ギャップが小さくなると、ギャップ付近の自己磁界の回り込みが抑制され、線材に加わる垂直磁界成分が減少し、垂直磁界に起因する交流損失が低減されるという効果が理解できる。測定及び数値解析の結果は概ね良く一致しており、測定・解析両者の妥当性が検証できたと考えられる。

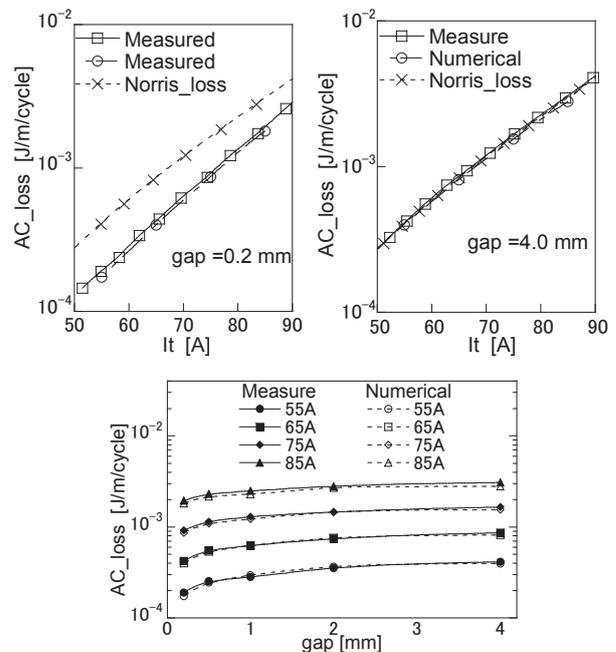


Fig. 3 Measured and numerical results of AC loss

## 参考文献

1. S. Fukui, et al., *IEEE Trans. on appl. Supercond.*, Vol.19, No.3, pp.1714-1717, 2009.

# 高温超電導線材の加熱による特性変化

## Characteristic Change in HTSs due to Temperature Rise

柄澤 彰良, 石山 敦士, 青木 徹, 神林 佑, 矢崎 真二郎(早稲田大学); 宮原 信幸(放医研)  
 KARASAWA Akira, ISHIYAMA Atsushi, AOKI Toru, KAMBAYASHI Yu, YAZAKI Shinjiro (Waseda Univ);  
 MIYAHARA Nobuyuki (NIRS)  
 E-mail: ak\_0323.karasawa@suou.waseda.jp

### 1. はじめに

超電導線材を機器応用する際には、その加工時に、はんだ付けやエポキシ含浸などが行われる。このような処理を行う際には、線材が 100℃を超えるような高温にさらされる場合もあり、線材の加熱・昇温に対する耐性のデータは工学的・工業的に非常に重要であるといえる。

そこで我々は市販の Bi-2223 線材および YBCO 線材を恒温炉で加熱し、加熱前後の I-V 特性( $I_c$ )を比較した。

### 2. 実験

試料線材として Table 1 に示す Bi-2223 線材と YBCO 線材をそれぞれ 24 本ずつ用意した。実験に用いた設定温度は、118℃, 135℃, 150℃, 185℃, 200℃, 250℃である。この温度の根拠は、超電導コイル製作時に用いるエポキシ剤の硬化温度が室温から 200℃程度であること、ハンダ融点がおおよそ 120~200℃であることによる。本実験では、加熱時間を 10 分間で固定し(一定温度を保持)、温度をパラメータとして特性評価を行った。

実験は、はじめに、超電導線材の  $I_c$  を計測しこれを初期  $I_c(I_{c0})$ とする。 $I_c$  測定は 77K 液体窒素浸漬冷却下および自己磁場中、1  $\mu$ V/cm 基準で行った。次に、Bi-2223 線材および YBCO 線材とそれぞれのダミー線材を恒温炉にセットし、まずダミー線材上の温度を基準に恒温炉中で加熱する。恒温炉内温度が設定温度に達したら Bi-2223 線材および YBCO 線材を各 4 本ずつセットする。セット後 10 分でサンプル線材を取り出し、Bi-2223 線材と YBCO 線材のうちそれぞれ 2 本を室温冷却(空冷)、残りの 2 本をエタノールに浸漬して冷却(急冷)する。最後に、昇温試験後の  $I_c$  値を計測し、 $I_{c0}$  と比較することで温度と  $I_c/I_{c0}$  の関係( $I_c/I_{c0}$ -℃特性)を評価した。

Table1 Specification of HTS samples.

material	Bi-2223	YBCO
manufacturer	Sumitomo	AMSC
process	CT-OP	MOD/RABiTS
length	100[mm]	100[mm]
width	4[mm]	4.4[mm]
thickness	0.22[mm]	0.22[mm]
$I_c$ (nominal rate)	140[A]	70[A](minimum)

### 3. 結果

Bi-2223 線材についての実験結果を Fig.1 に、YBCO 線材についての実験結果を Fig.2 に示す。

まず、Bi-2223 線材については今回実験したどの温度領域でも超電導特性に大きな劣化は確認されなかった。一方、YBCO 線材については 200℃付近から  $I_c$  値の低下が確認され、220℃においては  $I_c$  がおおよそ 10%低下している。さらに 250℃(245℃)では超電導状態が失われた。また、冷却方法の違いによる超電導特性の大きな差異は確認されなかった。

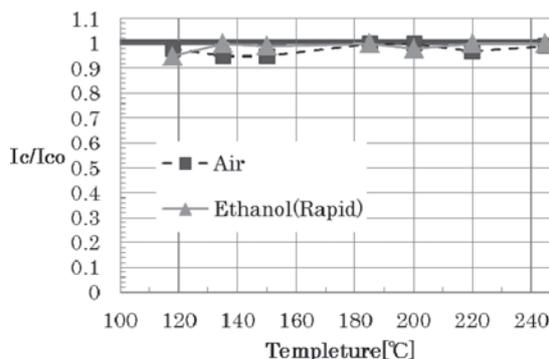


Fig.1  $I_c/I_{c0}$ -℃ relation of Bi-2223 HTS tape.

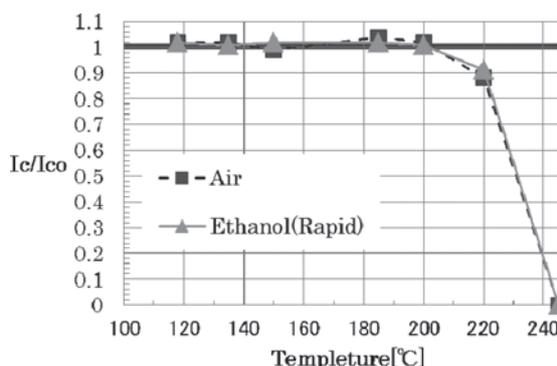


Fig.2  $I_c/I_{c0}$ -℃ relation of YBCO HTS tape.

### 4. まとめと今後の予定

今回の実験により YBCO 線材は 200℃前後で劣化が生じることが分かった。すなわち、AMSC 社の YBCO 線材は時間を 10 分以内に限定するならば 200℃以下で行う必要があるということがわかる。Bi-2223 線材については今回実験を行った温度範囲内では劣化が観測されなかったため、200℃以上に加熱が必要な後加工に耐性を有すると考えられる。また、緩やかな冷却と急冷の間での超電導特性変化に大きな変化が見られないことから、今回実験した温度範囲内では高温超電導線材において急冷による熱衝撃での超電導特性劣化は生じなかったことがわかる。本実験により、ハンダ付けやエポキシ含浸の限界温度という工業的指標を提示できたといえる。

今後は(1)Bi-2223 線材の耐熱温度評価のため 250℃以上の昇温を行う、(2)YBCO 線材の劣化温度確定のため 200℃~220℃での細かい昇温試験、(3)加熱によるひずみの影響を確認するためにひずみゲージを接着して加熱する、(4)温度を一定として時間をパラメータにした試験を行うということを予定している。

### 参考文献

1. AmericanSuperconductor:Guidelines for Handling Soldering and Splicing of 344 Superconductor Wire,1~3,(2005)

## 複数積層させたタイル状バルク超電導体の着磁特性

### Magnetization Characteristics of Arrayed and Stacked Bulk Superconductors

寺尾 悠, 関野 正樹, 大崎 博之(東大); 手嶋 英一, 森田 充(新日鐵)

TERAO Yutaka, SEKINO Masaki, OHSAKI Hiroyuki (Univ. of Tokyo);

TESHIMA Hidekazu, MORITA Mitsuru (Nippon Steel Corp.)

E-mail: y\_terao-008@ohsaki.k.u-tokyo.ac.jp

#### 1. はじめに

バルク超電導体は永久磁石よりも数倍強い磁界を捕捉出来ることから、モータや磁気分離をはじめとする様々な産業応用が期待されている。製作できるバルクのサイズには限りがあるが、複数のバルクを並べて着磁することで、大型の磁束源を実現することができる。しかし、バルク間の継ぎ目によって内部の電流が妨げられ、結果として一様な磁界を得ることが難しい。そこで、複数のバルク超電導体をタイル状に並べ、さらに複数積層させると、捕捉磁界分布特性の改善に有効であると考えている。

本研究では複数のバルク超電導体をタイル状に並べ、積層させて着磁した際の捕捉磁界分布の測定を行った。80 mm × 80 mm になるように配列したバルクの積層効果を検証する。

#### 2. 実験装置

Fig.1 (a) (b)に着磁実験で使用したバルク超電導体(改良型 QMG®法で作成)の配置図を示す。積層の方法としては、タイル状に敷き詰めた正方形のバルク超電導体のプレートの継ぎ目を覆うように積層させていく。すなわち、規則的な配置を一、二層目まで行い、三層目において漏れ磁束が継ぎ目から発生するのを防ぐため、配列中心をずらす。必要最小限のバルク超電導体で構成した場合、トータルで三層積層させることでバルク超電導体の継ぎ目を覆うことが可能である。これらに対して、超電導マグネットを用いて磁界中冷却を行い、外部磁界 2 T で着磁した。3 積層バルク超電導体の表面から 1.73 mm の面上をアキシアル型ホールセンサで二次元スキャンした。スキャン範囲は 80 mm × 80 mm とした。

#### 3. 実験結果

3 層構造の Fig.2 (b)の結果より、各バルクが最大で 500 mT ~ 600 mT 程度に着磁されている。特に右上のバルクでは最大 698 mT に着磁されていた。有効に着磁されている面積も 1 層構造の Fig.2 (a)より増加している。1 層目のみでは、隣り合うバルクの境界付近で磁束密度の向きが逆(マイナス)となっている部分が広がっていたが、3 層構造ではそのような逆向き磁界の領域が縮小している。また、マイナスとなった磁界の測定値は -100 mT 以内に収まっており、積層させることによりマイナス部分の絶対値も 1 層のみの場合より小さくなっている。

#### 4. まとめ

バルク超電導体をタイル状に並べ、複数積層させて着磁した場合の積層効果を検証する実験を行った。本実験により得られたことを以下に示す。

- 継ぎ目をずらして積層させることで、継ぎ目での逆方向磁界の発生を抑え、磁界の値自身も減少させることが出来る。
- 積層させることにより冷却温度 77 K、発生磁界 2 T の環境下で最大 698 mT の着磁値が得られた。

また今後行うべきこととして以下のような項目が挙げられる。

- スキャンする高さ(1.73 mm)及び外部磁界(2 T)を変化させた場合の磁束密度分布の測定
- 数値解析結果との比較及び考察

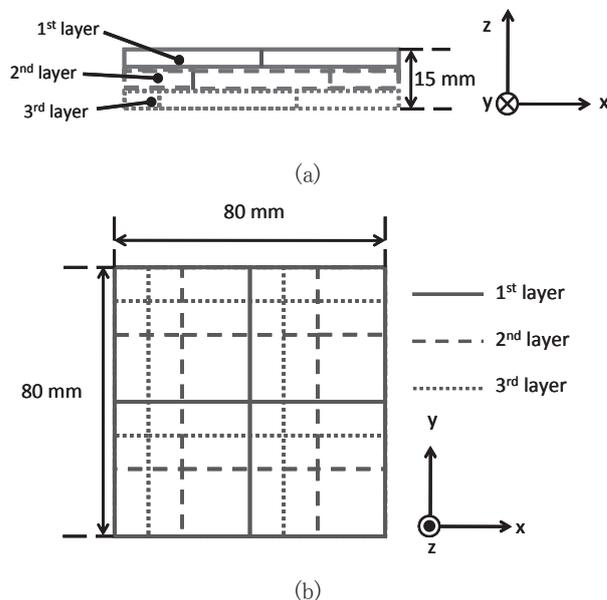


Fig.1 Arrayed and stacked bulk superconductors

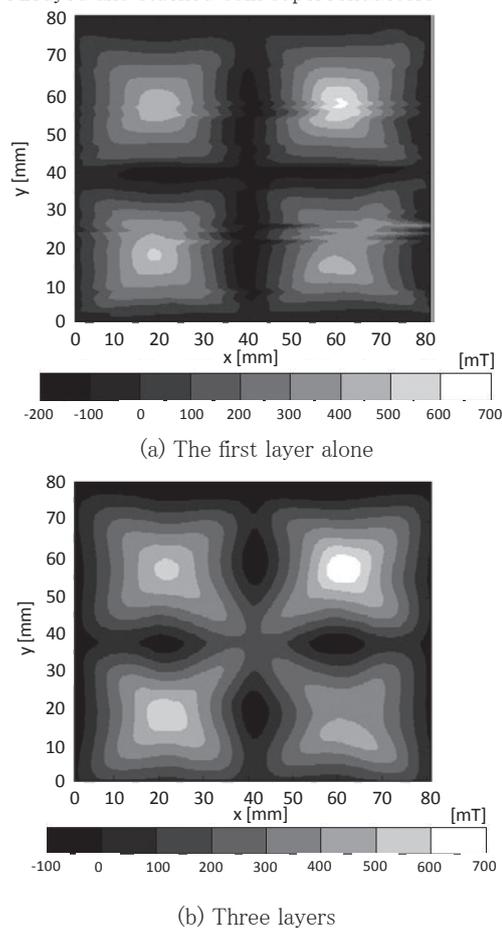


Fig.2 Two-dimensional distribution of magnetic flux density above bulk superconductors

# 超伝導ストリップによる磁気メタ材料の異方的透磁率

## Anisotropic permeability of magnetic metamaterials with superconducting strips

馬渡 康徳(産総研)  
MAWATARI Yasunori (AIST)  
E-mail: y.mawatari@aist.go.jp

### 1. はじめに

「メタ材料」とは微細構造をもつ人工的な機能材料であり、その微細構造を工夫することにより、自然界に存在する物質・材料では実現不可能な機能をもたせた「材料を超えた材料」である[1]。例えば、電磁波の波長より小さい微細構造を工夫して負の屈折率をもつ人工材料を作製するなど、電磁メタ材料に関する研究は最近急速に進展している[1,2,3]。また、微小超伝導薄膜を組織的に配列した構造をもつ直流磁気メタ材料も提案され、超伝導薄膜の磁気異方性を利用して磁場を制御し、ある物質の直流外部磁場に対する応答を消して隠してしまう磁気クロウキングの可能性が期待されている[4,5,6]。

本研究では、超伝導薄膜による磁気メタ材料の基本構造として超伝導ストリップの二次元無限配列を考え、これに直流垂直磁場を印加したときの磁気応答について理論的に考察した。

### 2. 超伝導ストリップの二次元無限配列

Fig. 1に、超伝導ストリップの二次元無限配列の断面図(xy面)を示す。超伝導層の厚さ $d$ は、ストリップ幅 $2w$ に比べて十分薄く( $d \ll 2w$ )、ストリップは長手方向( $z$ 方向)に直線状で無限に長いものとする。超伝導ストリップは、幅広面が $xz$ 面に平行になるよう $xy$ 面で無限に二次元配列され、その $x$ 方向の周期は $2a$ 、 $y$ 方向の周期は $2b$ である。

磁気メタ材料の磁気応答は、その巨視的透磁率により決まる[4,5,6]。Fig. 1の配列では、外部磁場を超伝導ストリップの幅広面に平行( $x$ 方向)に印加するとき、磁場はほとんどストリップの影響を受けないので、外部磁場 $H_a$ を面に垂直( $y$ 方向)に印加したときの電流・磁場分布について理論解析を行った。また、外部磁場 $H_a$ は十分小さいとして、超伝導ストリップが理想的なマイスナー状態にあり、超伝導ストリップ内部では完全に磁場が遮蔽されるとした。この場合の局所的な磁場分布は等角写像法により解析的に求めることができる。その解析結果は、 $2a \rightarrow \infty$ の極限では超伝導ストリップの一次元無限積層の場合[7]に一致し、また $2b \rightarrow \infty$ の極限では同一平面内の一次元無限配列の場合[7]に一致することを確認した。

### 3. 巨視的磁場と異方的透磁率

超伝導ストリップの配列における局所的な磁場 $h_y(x,y)$ および局所的な磁束密度 $b_y(x,y) = \mu_0 h_y(x,y)$ を $|x| < a$ 、 $|y| < b$ の単位格子で平均(粗視化)することにより、それぞれ巨視的磁束密度 $B_y$ および巨視的磁場 $H_y$ が得られる。ただし、巨視的な $B_y$ および $H_y$ がMaxwell方程式に矛盾しないよう注意して平均(粗視化)する必要がある[8,9]、具体的には

$$B_y = \frac{1}{2a} \int_{-a}^{+a} b_y dx, \quad H_y = \frac{1}{2b} \int_{-b}^{+b} h_y dy \quad (1)$$

より得られる。(1)式のように $B_y$ および $H_y$ を求める平均(粗視化)の仕方が異なるので、局所的には $b_y = \mu_0 h_y$ が成立しても、巨視的には $B_y \neq \mu_0 H_y$ である。すなわち、垂直磁場中の巨視的透磁率 $\mu_{\perp} = B_y/H_y$ は一般に $\mu_0$ とは異なる。

一方、外部磁場を超伝導ストリップの幅広面に平行( $x$ 方向)に印加するとき $\mu_{\parallel} = B_x/H_x$ より定義される平行磁場中の透磁率は $\mu_{\parallel} \approx \mu_0$ である。

### 4. 二次元磁気メタ材料

超伝導ストリップの磁気遮蔽効果により、一般に $\mu_{\perp} < \mu_0$ であり、特にストリップのエッジ同士の間隔が小さい( $1-w/a$ が小さい)ほど $\mu_{\perp}$ は小さくなる。こうして、超伝導ストリップの幅や配置を制御することにより、巨視的透磁率の異方性を大きく( $\mu_{\perp} \ll \mu_0$ )することができる。さらに、超伝導ストリップを組織的に配置することにより、空間分布する異方的な巨視的透磁率をもつ磁気メタ材料を構成することができる。こうして、磁気クロウキングなど磁場を制御する新機能を実現することが可能になる[4,5,6]。

本研究に関する有益な議論をしていただいた、バルセロナ自治大学(UAB)物理部門、C. Navau 博士および A. Sanchez 博士に感謝の意を表します。

### 参考文献

- [1] 石原照也 監修, 「メタ材料 — 最新技術と応用 —」, シーエムシー出版。
- [2] D.R. Smith et al, Phys. Rev. Lett. **84** (2000) 4184.
- [3] R.A. Shelby et al., Science **292** (2001) 77.
- [4] B. Wood and J.B. Pendry, J. Condens. Matter. **19** (2007) 076208.
- [5] F. Magnus et al., Nature Mater. **7** (2008) 295.
- [6] C. Navau et al., Appl. Phys. Lett. **94** (2009) 242501.
- [7] Y. Mawatari, Phys. Rev. B, **54** (1996) 13215.
- [8] J.B. Pendry et al., IEEE Trans. Microwave Theory Tech. **47** (1999).
- [9] D.R. Smith and J.B. Pendry, J. Opt. Soc. Am. B **23** (2006) 391.

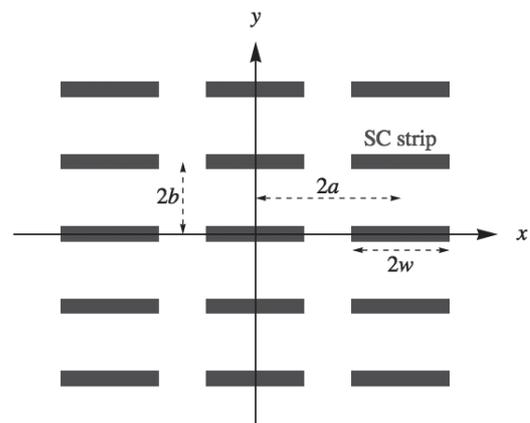


Fig. 1: Cross section of a two-dimensional array of superconducting (SC) strips.