

# SQUID によるラット心磁図への逆問題解析を用いた肺動脈性肺高血圧症検出法

## Detection of pulmonary arterial hypertension by inverse problem analysis of the rat's magnetocardiogram using SQUID system

安田 昌太郎, 日向野 将(早大); 小野 弓絵(明治大学); 梶村 いちげ, 南沢 享(東京慈恵医科大学); 石山 敦士(早大)  
 YASUDA Shotaro, HIGANO Sho (Waseda Univ.); ONO Yumie (Meiji Univ.);  
 KAJIMURA Ichige, MINAMISAWA Susumu (Jikei Univ.); ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.)  
 E-mail: yasu-013-show@toki.waseda.jp

### 1. はじめに

我々は、LTS-SQUID を用いた小動物用生体磁気計測システム[1]を用いて、心磁図(MCG)の計測を行い、MCG の変化と心疾患との関係を明らかにするための研究を行っている。本研究ではラットに薬物(モノクロタリン(MCT))を投与することで、肺血管障害性の右心室肥大を引き起こす、モノクロタリン誘発性肺高血圧モデルラット(MCT ラット)を作製し、心磁図を継時的に計測した。病理解剖検査により疾患の有無が確認されたラットの計測データに電流ダイポール推定を適用し、本手法の有効性の評価を試みたので報告する。全ての実験は早稲田大学動物実験審査委員会の承認を得て行われた。

### 2. 実験方法

MCT ラットのオス 3 匹, コントロールラット(CTRL ラット)のオス 3 匹の心磁図計測を 29~39 日間にわたり継時的に行った。MCT ラットは 6 週齢雄性 SD rat に MCT を 60mg/kg の用量で、CTRL ラットは同量の生理食塩水を皮下投与することで作製した。温水ベッドを作製し、その上にラットを仰向けにして、イソフルラン、亜酸化窒素、酸素の混合ガスによる吸入麻酔を与えて計測を行った。MCG の計測点は剣状突起を基準とし、6mm 間隔で 16 点(4×4)の複数点とした。心磁図と同時に心電図第 II 誘導を計測し、心電図の R 波ピークを加算平均処理時のトリガとして用いた。心磁図計測信号はサンプリング周波数 4000Hz, 1-1000Hz アナログバンドパスフィルタ, 50Hz ノッチフィルタを適用した。得られた心磁図データに 300Hz のデジタルローパスフィルタ, 1Hz のハイパスフィルタ, 50Hz のノッチフィルタ, ベースライン補正をした後に加算平均し、独立成分分析(ICA)によるノイズ除去を行った。ICA のアルゴリズムは fastICA を使い、SN 比が 1.4 以上である独立成分を MCG 成分とした。SN 比は心電図の QRST 波帯にある心磁図におけるピーク値をシグナル値, その他の時間帯にあるピーク値をノイズ値として計算した。この心磁図データに対し、心電図の R 波および S 波の時間帯において、0.25ms ごとに電流ダイポールを最小二乗法で推定し、興奮波面の角度の時間推移を求めた。心磁図計測と並行して心エコー検査を行い、B モード法, ドブラ法による肺高血圧症(Pulmonary Hypertension (PH))の評価を行った。実験終了後、心筋細胞上のギャップ結合の分布を同定するため、全てのラットから心臓を採取し、コネクシン 43 に対する免疫染色を行った(Fig.1)。

### 3. 実験結果と考察

電流ダイポール推定により、全てのラットの電流ダイポールの角度の時間変遷を評価した(Fig.2)。右心室肥大の進行に伴い、MCT ラット A は、R 区間において 25 日目、S 区間において 10 日目、MCT ラット B は、R 区間および S 区間において 29 日目、MCT ラット C は R 区間において 39 日目、S 区間において 21 日目に角度の変化を確認した。心エコー検査では MCT ラット A は 25 日目、MCT ラット B は 38 日目、MCT ラット C は 39 日目に PH の所見を得た。したがって、S 区間における電流ダイポール推定の結果は、心エコー検査よりも、MCT ラット A で 15 日、MCT ラット B で 9 日、MCT ラット C で 18 日早期に心筋異常を検出することができた。

電流ダイポール推定が心エコー検査よりも早期に心筋異常を検出できた理由は、電流ダイポール推定がギャップ結合の変化を検出できるからだと考える。ギャップ結合は化学的かつ電氣的な情報の伝達の役割を担う細胞間接合であり、コネクソンというチャンネル通路によって形成されている。コネクソンはコネクシンと呼ばれる膜蛋白質の六量体によって構成され、心筋内におけるギャップ結合では、主にコネクシン 43 が分布している。心筋の興奮は心臓内のギャップ結合に沿って伝播される。免疫染色画像より、MCT ラットは CTRL ラットよりも介在板部位でコネクシン 43 の発現が顕著であり、細胞質でも発現が増強していることを確認できた(Fig.1)。ギャップ結合内のコネクシン 43 の局在は心臓のリモデリングによって変化することが先行研究により報告されている[2]。原因は心臓のリモデリングにより引き起こされる心筋の線維化である。心筋の線維化の遺伝子経路は、心臓のリモデリングよりも早期に活性化される。したがって、電流ダイポール推定は心筋の線維化によるギャップ結合の変化によって生じた興奮伝播経路の変化を、電気生理学的に検出することができたため、心エコー検査よりも早期に心筋異常を検出することができたと考えられる。

### 4. まとめ

これらの結果は、本手法が心エコー検査よりも早期に肺高血圧モデルラットの心筋異常を検出するのに有効であることを示した。さらに、小動物を用いた肺高血圧症の治療薬の薬理効果を検証する研究等へ応用することも期待される。

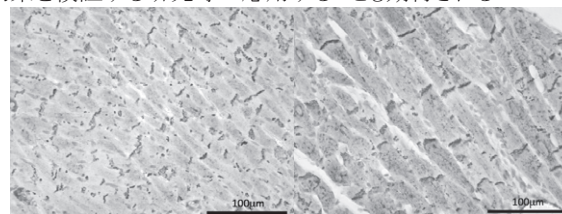


Fig1. The immunostaining method (Connexin 43) for CTRL rat C (left) and MCT rat A (right)

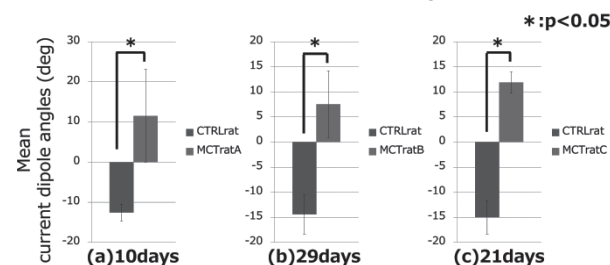


Fig2. Results of t-test in S wave interval

### 参考文献

- Y. Ono, et al. "Development of biomagnetic measurement system for mice with high spatial resolution", Appl. Phys. Lett., vol. 85, pp.332-334, 2004.
- H. Honjo, et al. "Gap junction remodeling in hypertrophied left ventricles of aortic-banded rats: prevention by angiotensin II type 1 receptor blockade," J. Moll. Cell. Cardiol., vol. 33, no. 2, pp. 219-231, 2001.

# 潤滑油の定圧弾性係数に対する温度依存特性

## Temperature dependence of the bulk modulus

重松 利信(佐世保高専);小野 文慈(佐大・教育)

SHIGEMATSU Toshinobu (National Institute of Tech., Sasebo College); ONO Bunji (Saga Univ.)

E-mail: shige@sasebo.ac.jp

### 1. はじめに

機械摺動面間の潤滑油は1GPaオーダ以上の圧力を受ける場合、粘性が指数関的に増加すること知られている。この特性は圧力粘度係数で規定されるが、これを求めるには高压雰囲気中での粘性測定を行わなければならない非常に難しいものとなっている(1)(2)。もともと潤滑油の粘性増加は分子自由の減少による分子間力の増加であり、圧力に関する粘性特を示すものとして Barus の式(3)、温度に関する粘性特を示すものとしてアンドレーの式があり、いずれも指数関で表さ同様な振る舞いをすると考えられる。

そこで本研究では、圧力による圧縮特性を調べ代わり、低温度下の圧縮特性調べることで圧力粘度特性を推定するねらいがあり、本講演では特に低温度下における各種潤滑油の密度と体積弾性係数の関係を音速測定から導き出したので報告する。

### 2. 実験装置

図1に試験装置全体の概略図を示す。測定は低温度下での密度と音速を測定する。音速は恒温槽の中で超音波振動子から出る音波を受信振動子で感知し、試料の超音波伝播時間を計測して求める。同時に浮力型比重計で試料の密度の変化を調べている。冷却は液体窒素の流量により調整しているが、恒温槽の場所により冷却の偏りがあるため各々熱電対を挿入して温度を測定している。Table1 に実験で使用した潤滑油の性状を示す。

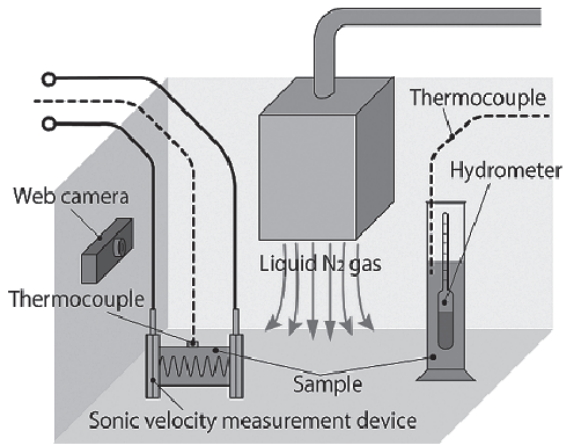


Fig.1 Experimental Setup

Table 1 Oil properties

Classification	Sample	$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\nu$ [mm <sup>2</sup> /s]		
			15°C	40°C	100°C
Mineral oil	H60	0.854	8.192	2.280	
	H150	0.868	31.21	5.357	
Synthetic oil	PAO32	0.83	30.50	5.90	
Gear oil	RO150	0.868	150	18.0	
Traction oil	S100	0.9289	99.5	7.90	

### 3. 体積弾性係数の測定

液体媒質中の音波の伝播方程式を解くと、油中に伝わる音速  $v$  は、体積弾性率  $K$  と密度  $\rho$  を用いて

$$v = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$$

で表される。従って音速と密度  $\rho$  を測定することで  $K$  を求めることがわかる。さらに、液体の体積ひずみ  $\epsilon$  は体積を  $V$  として、温度と圧力の関数なので

$$\epsilon = \frac{dV}{V} = \left[ -\frac{\partial(\ln \rho)}{\partial p} \right]_T dp + \left[ -\frac{\partial(\ln \rho)}{\partial T} \right]_p dT$$

で表される。第1項は断熱体積弾性係数であり、第2項は本研究で注目している定圧体積弾性係数である。通常潤滑状態ではすべり速度が大きいので、熱の授受が行われないため断熱過程と考えられ、第2項が省略される場合が多い。

### 4. 結果と考察

図2に温度低下に伴う音速の変化を示す。各種潤滑油は、大きさは異なるものの温度が低下するにしたがって、油中音速もほぼ直線的に、潤滑油の種類によらずほぼ同じ勾配で上昇する結果を得た。

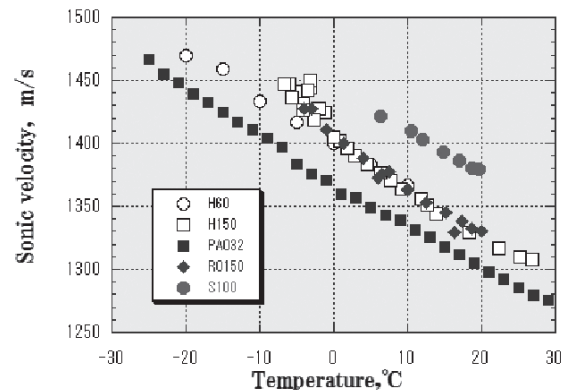


Fig.2 Sonic velocity measurement results

### 参考文献

- 大野, “高面圧下における宇宙用潤滑油のレオロジーとトライボ特性”, トライボロジス, Vol.57, No.2 (2012), pp. 103 -111 .
- Nobuyoshi Ohno, Hirohito Mori, Toshifumi Mawatari, Bo Zhang, Bunji Ono, et al, “Prediction of Pressure-Viscosity Coefficient of Environmentally Friendly Vegetable Oils from Adiabatic Bulk Modulus Based on Sound Velocity under Atmospheric Pressure”, ASIATRIB 2014, TS1914526. pdf.
- Barus,C., American J. Sci.,3, 45(1893) 87.

# 光ファイバ温度センサの極低温特性(その5)

## — 複合めっき方式センサの試作および温度計測試験 —

### Cryogenic characteristics of an optical fiber sensor (Fifth Report)

#### — Trial of the combined plating method and the temperature measuring experiment —

杉野 元彦, 水野 克俊, 田中 実, 小方 正文(鉄道総研)

SUGINO Motohiko, MIZUNO Katsutoshi, TANAKA Minoru, OGATA Masafumi (RTRI)

E-mail: sugino.motohiko.79@rtri.or.jp

#### 1. はじめに

光ファイバ温度センサは、1本のセンサで多点温度計測が可能であり、さらに熱侵入が少ない、電気絶縁性が高く電磁場の影響を受けないなど、高磁場、低温下での使用に優れた特性を持つ。そのため、超電導磁石内部の極低温環境での温度を計測する技術の開発を行ってきた。

これまでに、光ファイバにチタンと銅をスパッタリングしてその上に亜鉛を電気めっきでコーティングする電気めっき方式を開発した。<sup>1-3)</sup> しかしこの製法は、専用の設備と多くの工数を必要とするため、製作コストが大きいという課題がある。

そのため第3報にて、安価な無電解めっきと電気めっきを組み合わせる製法について検討し、センサ機能を持たない光ファイバを用いためっき定着試験結果について報告した。<sup>4)</sup>

今回、改良したコーティング方法にて光ファイバを試作し、温度計測能力の計測試験を行ったので報告する。

#### 2. エッチング方法の検討

無電解めっきは、還元剤にめっき対象物を浸し、酸化還元反応によって金属を析出させるめっき方法である。

第3報にて、無電解めっきは析出した金属が剥離しやすいこと、表面を荒らして摩擦係数を向上させるエッチング処理を行うことで定着度が向上し剥離を防止できることが分かった。また、強アルカリ系溶液によるエッチングが、コーティングの表面を最も均質にするという結果を得た。

しかしさらに試験を行った結果、アルカリ系溶液は光ファイバを浸食して小径化し、濃度によっては光ファイバが消失することが判明した。センサ部の浸食は異常出力や機能喪失につながることから、アルカリ性溶液によるエッチング処理は困難であると判断した。

そこで今回、シリコンを浸食しない酸性溶液を対象にめっき定着試験を行った。酸性溶液はエッチング効果を得にくいという課題があるため、今回、エッチング処理溶液と無電解めっき処理の溶液を組み合わせ、18通りの組み合わせの溶液を用いて光ファイバへのめっき試験を行った。その結果から、最もコーティングの表面状態が良い配合を採用した。

#### 3. 複合めっき型センサの試作および温度計測試験

採用した配合を元に、複合めっき方式として、①酸性エッチング処理、②無電解めっきによるニッケルコーティング、③電気めっきによる亜鉛コーティング、という3つのプロセスによる光ファイバ温度センサの製法を考案した。

この製法で温度センサの試作品を製作し、クライオ内で室温から16Kまで冷却し、波長および波長の変化率を計測した。(Fig. 1) 試験結果から、試作した光ファイバ温度センサが250Kから16Kまで温度を計測できることを確認した。

#### 4. 試作結果による製法の改善

今回の試作時、ニッケルコーティング後の目視検査で、めっき状態が悪いものが確認された。悪いものは、コーティング部分の中に厚い部分や薄い部分が生じている、表面にささくれ状に荒れているなど、めっきの品質が悪い状態であり、全

体の2割程度発生した。(Fig. 2)

この原因として、溶液内でニッケル析出反応が進むにつれて溶液内で局所的なニッケルイオン濃度の不均一を生じ、析出反応の不均一につながっていると推定された。そのため、濃度および浸漬時間を調整してめっき定着試験を行った結果、溶液を攪拌しながら低濃度化、浸漬時間の長時間化をすることで、濃度不均一の発生を防止できることが分かった。

#### 5. まとめ

新たに開発した複合めっき製法にて、極低温用光ファイバセンサを試作し、温度測定試験を行った。センサは極低温で良好な計測能力を示し、試作と評価試験を通して、センサ製法としては一定の見込みが立てられた。今後、コーティング厚さを改良して試作を行い、性能評価を行う。

なお、本研究の一部は国土交通省の補助金を受けて実施した。

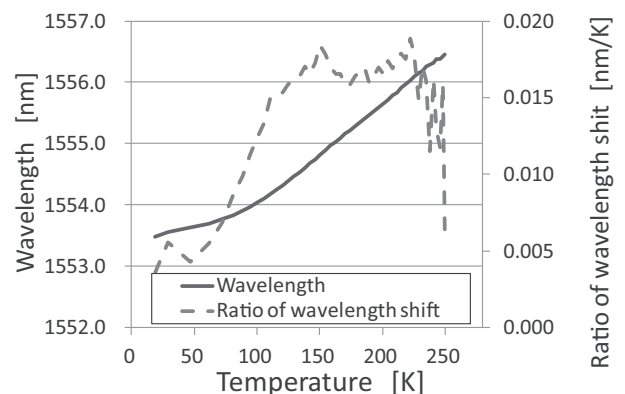


Fig.1. Temperature characteristics of the wavelength

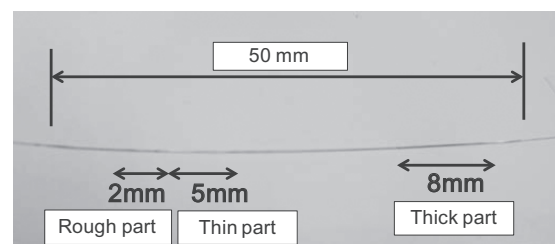


Fig.2. The rejected prototype that has thick part, thin part and rough part in the nickel coating.

#### 参考文献

1. H. Yamada, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 86 (2012) p.72
2. H. Yamada, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 87 (2013) p.57
3. M. Sugino, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 90 (2014) p.74
4. H. Yamada, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 89 (2014) p.51

# 浮上式鉄道用 RE 系高温超電導磁石の開発 -磁石構成部材のアウトガス評価(その2)- Development of REBCO HTS Magnet for Maglev -Measurement of Outgas from Magnet Members (Secondary Report)-

水野 克俊, 杉野 元彦, 田中 実, 小方 正文(鉄道総研)

MIZUNO Katsutoshi, SUGINO Motohiko, TANAKA Minoru, OGATA Masafumi (RTRI)

E-mail: mizuno.katsutoshi.14@rtri.or.jp

## 1. はじめに

鉄道総研では、希土類系高温超電導線材の磁場中での優れた通電特性に着目し、浮上式鉄道への適用を検討している。液体ヘリウムが不要になり、冷凍機消費電力の低減等の利点がある半面、アウトガスの対策が不可欠となる。運用温度の上昇に伴い、特定のガスに対してはクライオポンプ効果が得られなくなり、アウトガスが蓄積され真空断熱が劣化してしまうためである。特に、浮上式鉄道のような長期間真空槽封じ切りでの運用が求められる機器においてはアウトガス低減が極めて重要である。そのため、超電導磁石を構成する主要な部材からのアウトガス特性を評価した。

## 2. アウトガス測定サンプル

アウトガス発生メカニズムやこれまでの試験結果より[1]、低温の部材からは材料や表面状態によらず、アウトガスの発生は実質的に無視できるほど小さいことが確認された。また、エポキシ等の樹脂材料は、わずかな表面積でも大量のアウトガスを放出することも確かめられている。そのため、今回の評価試験では、超電導磁石室温部かつ大面積を占める部材、すなわち真空容器内壁と多層断熱材(MLI)について評価を行うこととした。

アウトガスの放出量は素材だけでなく表面状態にも依存する特徴がある。そのため、超高真空チャンバならば電解研磨等の処理が一般的であるが、今回は汎用のクライオスタットを想定して、サンプル表面は通常の機械加工仕上げとした。また、真空容器は溶接で製作されることが多いので、図 1 に示すような溶接部を持つサンプルも用意した。研磨は行わず、溶接そのままの表面を有している。MLI についてはスペーサー(ポリエステルメッシュ)の有無で 2 種類を評価対象とした。今回計測したサンプル一覧を表 1 に示す。

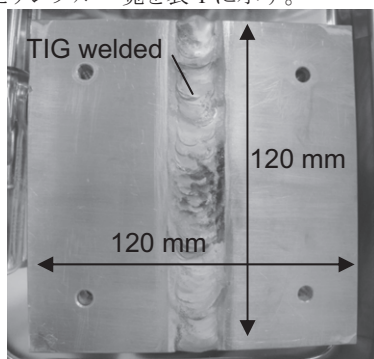


Fig.1 Picture of a welded test specimen. Two aluminum plates were TIG welded.

Table1 Test specimens for outgas evaluation.

	Detail
Aluminum plate	JIS A1070, machined metal plate
Welded plate A	TIG welded aluminum plate
Welded plate B	Same as "Welded plate A"
MLI (w/o mesh)	100 layers
MLI (w/ mesh)	100 layers

## 3. アウトガス測定

アウトガス放出量の測定には流量法を用い、真空排気装置上流に設けられたオリフィス(流路抵抗)の前後での差圧よりアウトガス放出速度を求めた。また、アウトガス成分については四重極質量分析器を用いている。

アウトガス測定手順としては、大気への暴露条件をそろえるため、まずサンプルをアウトガス評価装置に設置してベーキングを行い、その後一定時間大気開放を行った後に真空排気、アウトガス測定の流れとなる。

測定結果の一例として、真空排気開始から 25 時間後の単位面積当たりのアウトガス放出量を図 2 に示す。なお、MLI については、過去の試験結果からアウトガスの放出量が少ないことが予測されたため、100 層 1 セットを基準としている。また、アウトガス評価装置自体からのアウトガス放出も無視できないため、サンプル未設置時のバックグラウンドデータを取得して、その差分を正味のアウトガス放出量としている。

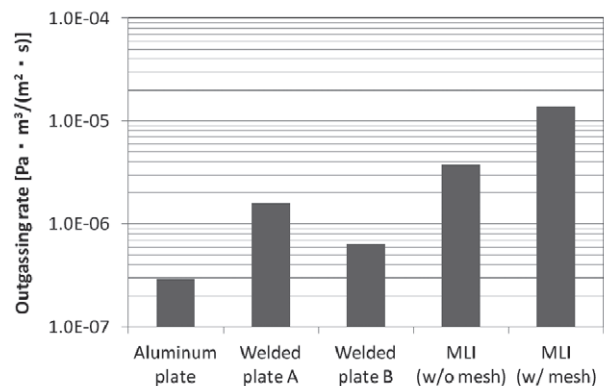


Fig.2 Comparison of Outgassing rates at 300 K after 25 hours of vacuuming.

溶接を行ったサンプルからのアウトガス放出速度は、溶接を行っていないアルミ板よりも若干高い傾向を示している。ただし、樹脂材料のように極端に高いというわけではなく、決定的なアウトガスの発生源とはならない。

また、MLI からのアウトガス放出量は他のサンプルよりも大きいものの、これは 100 層 1 セットを基準としたためである。一般的な施工枚数よりも多いことに加え、実際には内側の層は低温に冷却されアウトガスをほぼ放出しないことを考慮すると、MLI も主要なアウトガス放出源ではないと考えられる。

これらの結果より、樹脂材料を大量に用いない限り、超電導磁石においては、突出したアウトガス発生源があるわけではなく、各構成部材からの積算でアウトガス放出量は決定されると考えるのが妥当である。

本研究は国土交通省の国庫補助金を受けて行った。

## 参考文献

1. K. Mizuno, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 90 (2014) p.172

# 引っ張りひずみ印加アニールによる REBCO コート線材のデツインの最適化

## Optimization of detwin process for REBCO coated conductor by annealing under a tensile strain

長谷川 浩太, 小黒英俊, 淡路智, 渡辺和雄(東北大)

HASEGAWA Kouta, OGURO Hidetoshi, AWAJI Satoshi, WATANABE Kazuo (Tohoku Univ.)

E-mail: k.hasegawa@imr.tohoku.ac.jp

### 1. はじめに

希土類系高温超伝導線材  $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  (RE: Y 若しくは希土類元素) coated conductor の臨界電流密度  $J_c$  の向上は、実用化にあたり、非常に重要である。この問題に対し、我々は coated conductor の REBCO 結晶の向きに注目し、研究を行ってきた。通常の coated conductor は、REBCO 結晶の  $c$  軸がテープ面垂直方向に揃っており、 $a$  または  $b$  軸が面内方向で同方向に揃った、2 軸配向した構造をとっている。このとき、 $a$  軸、若しくは  $b$  軸が同じ向きを向いた 2 種類のドメインが存在するが、これが双晶を形成している。これに対して我々は、REBCO coated conductor をひずみ下でアニールすることにより、双晶の除去(デツイン)を行う方法を開発し、3 軸配向膜の作製に成功した[1]。この 3 軸配向膜を用いて、臨界温度  $T_c$  のひずみ効果に関して、各軸の変化が  $T_c$  に与える影響が異なることを明らかにした[2]。

ただし、完全にデツインした試料には多数のクラックが入っており、デツインが  $J_c$  に与える影響は未だ分かっていない。そこで本研究では、ひずみ印加アニールの印加ひずみ量、アニール温度等の制御により、クラックが生じない条件とデツインが起こる条件を調べたので報告する。

### 2. 実験方法

用いた試料は SuperPower 社の REBCO coated conductor である。この試料は、線材長手方向に  $a, b$  軸が揃っており、線材長手方向に引張り荷重を与えることで、デツインが可能となる。

本研究では、REBCO coated conductor にクラックが生じない条件とデツインが起こる条件を調べるために、多数の試料を、安定した条件下で作製する必要があった。そこで、ロードセルで測定した荷重を用いて、モーターによりシャフトを動かすことで引張り加重印加速度の制御を行い、管状炉の温度と連動して制御することによって、coated conductor をひずみ下でアニールする工程を全自動化した。これにより、印加荷重のぶれが少なくなり、作製する時間の制御が可能となった。図 1 に自動化した引張りアニール装置を示す。炉の中央に試料が設置してあり、右側を固定してある。炉の左側に取り付けられたモーターによりシャフトを動かし、引張り荷重を加える。

試料を 3 cm に切り取り、両端 1 cm を挟み込む。450°C 大気中で 30 分間、一定の応力印加速度によって引張り荷重を与え、その荷重を維持したまま 1 時間かけて 200°C まで温度を下げた。今回、0 N、50 N、100 N、150 N それぞれの荷重を印加して引張りアニールを行った。ここでそれぞれの荷重は 231 MPa、462 MPa、692 MPa の応力に相当する。また Hastelloy の 450°C でのヤング率 180 GPa [3] から計算すると、それぞれのひずみは 0.13%、0.26%、0.38% となるが、0.2% 以上で塑性領域にある可能性があるため、現在、高温での応力-ひずみ曲線の測定法を検討中である。作製した試料は、X 線回折によって線材長手方向の(200)及び(020)ピーク強度を比較することで、デツインの状況を調べ、四端子法によって臨界電流  $J_c$  の測定をおこなった。

### 3. 実験結果と議論

図 2 に、REBCO coated conductor を 450°C でアニールした際の荷重の違いによる、(200)及び(020)ピーク強度の変化

を示す。強度は(200)ピークの値で規格化してある。図より、0 N と 50 N では 2 つのピーク強度に大きな違いは見られないが、100 N 以上では、(200)ピークの強度が小さくなっていることが確認された。これより、450°C では 100 N 以上の荷重印加により、coated conductor 内でデツインが進むことが分かった。

また、各線材の  $J_c$  測定を行ったところ、 $J_c$  は確認できなかった。この原因は、アニールの過程で REBCO 中の酸素が抜けた可能性と、ハステロイの高温での熱膨張によりクラックが入った可能性の 2 つが考えられる。このことから、酸素雰囲気中で同様の実験を行う必要があると考えられる。温度を変化させたときのデツイン条件、酸素雰囲気中での結果は当日報告する。

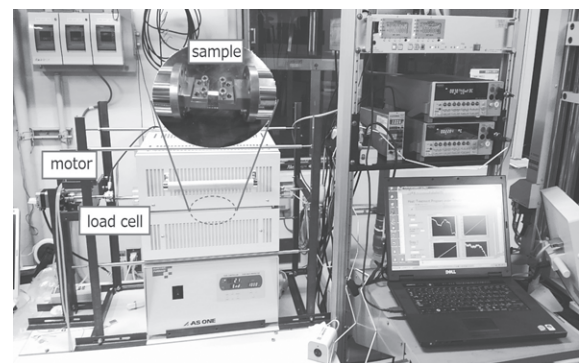


Fig. 1 The photograph of the tensile annealing system.

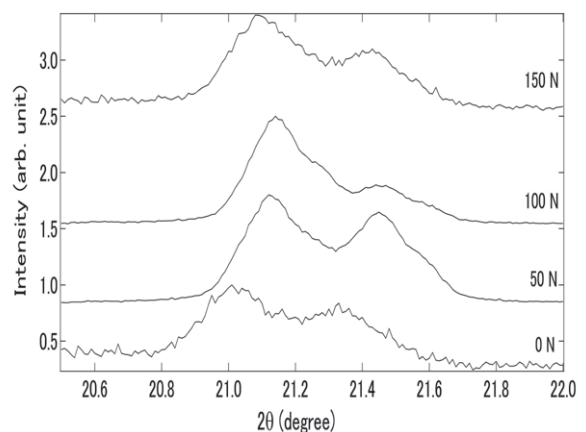


Fig. 2 The (200) and (020) diffraction patterns in the longitudinal direction of the REBCO coated conductor after annealing under various tensile loads.

### 参考文献

1. T. Suzuki, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 25 (2015) 8400704.
2. S. Awaji, et al.: Sci. Rep., Vol. 5 (2015) 11156.
3. Y. Luo, et al.: Materials and Design, Vol. 84 (2015) 212

## 曲げアニールによる REBCO コート線材のデツイン化

Detwinning -process of REBCO coated conductors by annealing under bending strain.

千葉滉平, 淡路智, 小黑英俊, 土屋雄司, 渡辺和雄 (東北大)

CHIBA Kouhei, AWAJI Satoshi, OGURO Hidetoshi, TUCHIYA Yuji, WATANABE Kazuo (Tohoku Univ.)

E-mail: kouhei.kinken@imr.tohoku.ac.jp

### 1. はじめに

希土類系高温超伝導体 (REBCO) コート線材はテープ状の線材として用いられており、磁場中でも高い臨界電流密度を持つ。加えて、高強度の金属基板を用いることから、高い耐力特性を持つ。これらの特徴から低温・強磁場マグネットへの応用が期待されている。しかし、マグネット応用において重要であるひずみ依存性は未だ明らかとなっていない。この原因として超伝導層が2軸配向していることが挙げられる。通常ひずみが印加される前の線材の長手方向には、 $a$  軸を持つ A ドメインと  $b$  軸を持つ B ドメインが双晶を形成し、ほぼ同程度存在している。これにより REBCO コート線材のひずみ効果は、自己磁場下でべき乗の振る舞いを示すが、磁場中では圧縮側と引張り側の両方にピークを持つなど複雑なひずみ依存性を示す。これらは REBCO 単結晶で、 $T_c$  の圧力効果が  $a$  軸と  $b$  軸で逆の効果を示すことに起因していると予想されている。これまで  $a$  軸と  $b$  軸の各軸の  $I_c$  ひずみ依存性を分けて考えることにより、各ドメインのひずみ依存性を記述するモデルで解析が行われてきた。このような解析のため、実験的に各軸のひずみ依存性を明らかにすることが求められている。

先行研究では、REBCO 線材に対してひずみ印加アニールを加えることで、デツインすることに成功し[1,2]、その結果  $a$  軸、 $b$  軸それぞれのひずみに対して  $T_c$  の変化が逆となることを示した[3]。しかし、アニール時のひずみが 0.5%程度を超えるとクラックが入り、臨界電流密度特性が大きく劣化した。今回、高温中で圧縮ひずみを加えることでクラックの発生を抑えることを試みた。本報告では、デツインしたコート線材の臨界電流密度の曲げひずみとクラックによる  $J_c$  特性劣化について議論する。

### 2. 試料緒元・実験方法

試料線材は SuperPower 社製の MOCVD 法によって作製した (Y,Gd)BCO コート線材を用いた。この試料に対して、酸素中で 450°C に昇温してから圧縮曲げひずみを印加したのち、6 時間保持して、降温させた。圧縮曲げひずみを印加する際には、曲げ治具を用い、超伝導層が半円の内側に来るように設置し、450°C に達した瞬間にひずみを印加した。臨界電流密度は試料をフォトリソグラフィ及びエッチングにより、幅約 100  $\mu\text{m}$ 、長さ約 1 mm のブリッジ形状に加工し、直流四端子法を用いて測定した。電界基準は  $1 \times 10^{-6}$  V/cm とした。

### 3. 実験結果・考察

Fig. 1 に曲げアニール前 (as-received) と圧縮曲げひずみアニールを行った試料の線材長手方向における、(200)、(020) ピークの X 線回折パターンを示す。比較のため強度は各々の (200) ピークの最大値で規格化してある。圧縮曲げひずみアニールによってピーク強度がそれぞれ変化した。as-received では (200) のピーク強度が (020) ピークに対して小さいのに対し、圧縮曲げひずみアニールを行った試料では長手方向に (020) ピーク強度が低下していることが分かる。この結果から曲げひずみ 0.5% では、約 50% デツインしており、1.0% では、約 80% デツインしていることが分かった。

Fig. 2 では 1.0% の圧縮ひずみをかけた  $J_c$  の磁場依存性を示す。77.3 K 自己磁場の  $J_c$  は 1.93 MA/cm<sup>2</sup> であり、 $J_c$  の劣化がほぼ無いと考えられる。これまでの引張りアニールによるデツイン試料の場合に  $J_c$  が 2桁以上減少する結果を克服するという結果となった。当日は、デツイン時の最適条件においても

合わせて報告する。

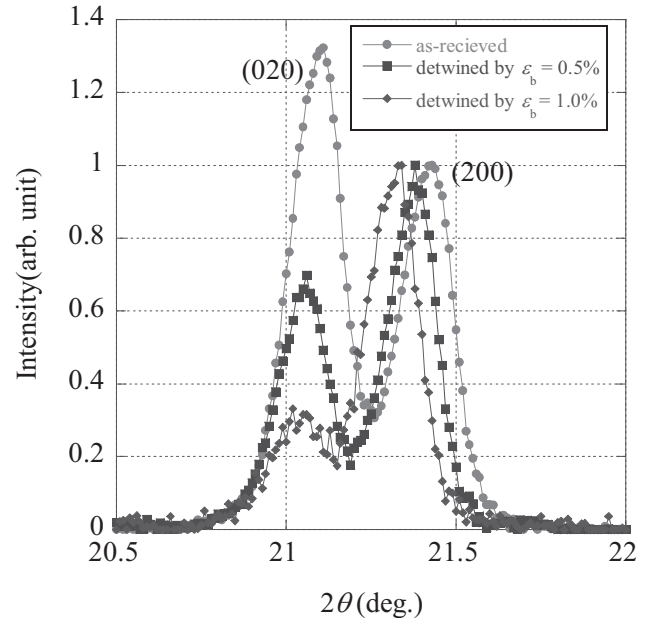


Fig. 1 (200) and (020) reflections along the longitudinal direction after the annealing under compressive bending strains  $\epsilon_b = 0.5$  and 1.0% in the (Y,Gd)BCO coated conductors

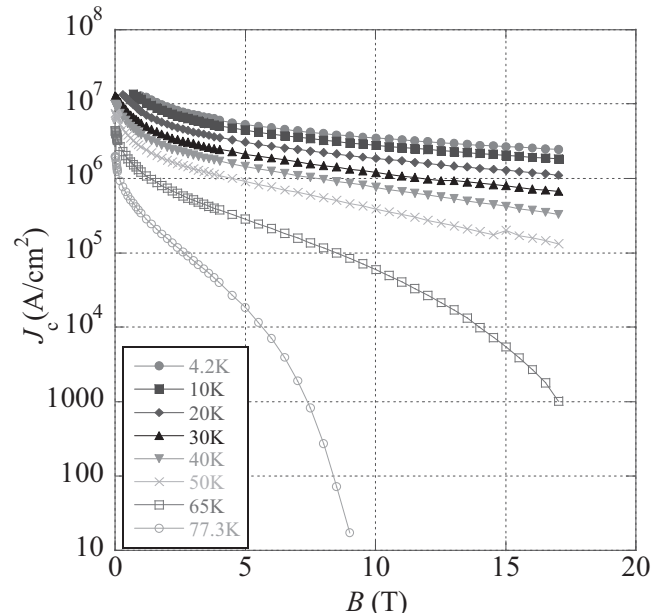


Fig. 2 Magnetic field dependence of  $J_c$  for the (Y,Gd)BCO tape after the annealing with 1.0% bending strain at 4.2-77.3 K

### 参考文献

1. T. Suzuki, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 89 (2013) p.159
2. T. Suzuki, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 25 (2015) 8400704.
3. S. Awaji, et al.: Sci. Rep., Vol. 5 (2015) 11156.

# 人工ピンを導入したY系超電導薄膜の縦磁界下における臨界電流特性 Critical current properties in longitudinal magnetic field of APC doped YBCO superconductor

木内 勝, 木戸 竜馬, 小田部 荘司, 松下 照男, JHA Alok K., 松本 要 (九州工業大学)  
 KIUCHI Masaru, KIDO Ryoma, OTABE Edmund S., MATSUSHITA Teruo,  
 JHA Alok K., MATSUMOTO Kaname (Kyushu Inst. of Tech.)  
 E-mail: kiuchi@cse.kyutech.ac.jp

## 1. はじめに

電流  $I$  通電方向と同方向に磁界  $B$  が加わる縦磁界下 ( $B//I$ ) は、環境を変えるだけで臨界電流密度  $J_c$  を増加させることができる。この縦磁界下での  $J_c$  増加は線材内での  $B$  と  $I$  の平行度に大きく依存し、超電導体内の結晶配向や異相などによる電流経路の乱れの影響を顕著に受ける。これまでの調査により、適当な人工ピン(Artificial Pinning Center; APC)を導入することで縦磁界下の  $J_c$  が大きく増加し、 $J_c$  の増加量は人工ピンの導入量や、超電導層の厚さによって変化することが確認された[1]。

本研究では、人工ピンの添加量を変化させたYBCO超電導薄膜の縦磁界下での  $J_c$  特性を評価し、添加量と  $J_c$  増加量の関係について調べた。

## 2. 実験方法

用いた試料は SrTiO<sub>3</sub> 単結晶基板上に PLD(Plus Laser Deposition)法で成膜したYBCO超電導薄膜である。Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の人工ピンは、表面修飾ターゲット法を用いて導入した。添加した量は3.0, 4.0, 5.5 areal. %の3種類である。また導入された人工ピンの形状は粒状で、粒径は5-10 nm程度である。各試料の厚さと自己磁界における  $J_c$  をTable 1に示す。

$J_c$  は直流四端子法を用いて評価した電流密度  $J$ -電界  $E$  特性から求めた。試料は1 mmのマイクロブリッジに加工した。 $J_c$  は電界基準  $1.0 \times 10^{-4}$  V/mを用いて決定した。試料に加える磁界の方向はFig. 1に示すように、全ての測定は液体窒素中で行った。全ての測定で磁界は  $ab$  平面に平行、通電電流に対して平行の場合が縦磁界( $B//I$ )で、垂直が横磁界 ( $B \perp I$ )とした。

## 3. 実験結果と考察

Fig. 2に超電導層  $d$ の厚さが同程度の添加量を変化させた試料の縦磁界下( $B//I$ )および横磁界下( $B \perp I$ )での  $J_c - B$  特性を示す。4.0 areal. %の試料において自己磁界の  $J_c$  を越えるような大きな値が得られた。他の試料でも、横磁界下の  $J_c$  より大きな値となった。但し、横磁界下の  $J_c$  の磁界依存性は、4.0 areal. %が一番大きく、0.5 T近傍になると、3つの試料で同程度の  $J_c$  値になり、磁界の加わる方向でピンの作用が異なることがわかる。

Fig. 3に自己磁界  $J_c(0)$ からの  $J_c$  の増加率と、ピン添加量の関係を示す。4.0 areal. %が最も大きな増加率になっている。特に、5.5 areal. %の添加は、横磁界下の  $J_c$  には

Table 1 : Specifications of specimens.

	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Content [areal. %]	$J_c^{s.f.}$ @77.3 K [GA/m <sup>2</sup> ]	Thickness of superconducting layer $d$ [nm]
#1	3.0	18.0	170
#2	4.0	23.4	170
#3	5.5	21.3	158
#4	5.5	12.4	162
#5	5.5	23.4	211
#6	5.5	18.0	242

磁界依存性から有効であるが、縦磁界下では電流の流れの妨げになると考えられる。

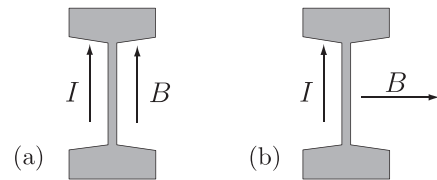


Fig. 1: Arrangement of current  $J$  and magnetic field  $B$  for the measurement of  $J_c$ . (a)  $B//I$  ( $I//ab$ ), (b)  $B \perp I$  ( $I//ab$ ).

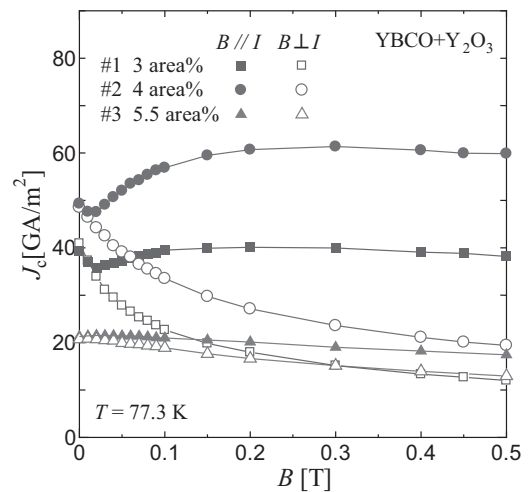


Fig. 2:  $J_c - B$  properties at 77.3 K.

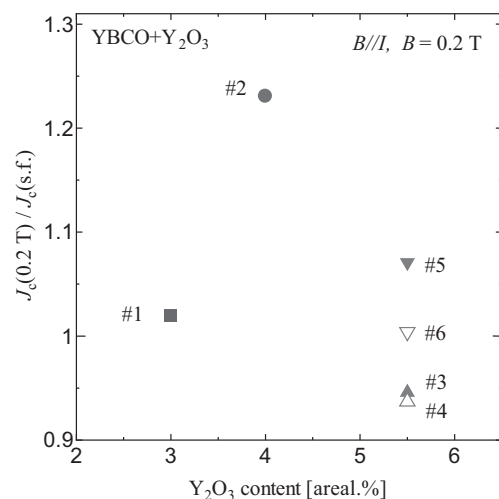


Fig. 3: Relationship between normalized  $J_c$  and Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> content.

## 参考文献

1. K. Sugihara, et al.: Superconductor Science and Technology, 28 (2015) 104004.

# 液体水素液面計用線材を構成する MgB<sub>2</sub> コアと ステンレス鋼シースの抵抗の温度依存性

## Temperature Dependence of Resistances in MgB<sub>2</sub> Core and Stainless-Steel Sheath Composed of Wires for Liquid Hydrogen Level Sensor

小塩 順平, 柁川 一弘(九大); 山田 豊(東海大); 巻野 桃子, 青木 五男(ジェック東理社)  
KOSHIO Jumpei, KAJIKAWA Kazuhiro (Kyushu Univ.); YAMADA Yutaka (Tokai Univ.);  
MAKINO Momoko, AOKI Itsuo (Jecc Torisha)  
E-mail: koshio@sc.kyushu-u.ac.jp

### 1. はじめに

将来の水素エネルギー社会の構築に向けて、圧縮水素ガスよりも体積密度の大きい液体水素の活用が望まれている。その際、容器内の液体水素の残量を正確に把握する必要があり、その手法の一つとして MgB<sub>2</sub> 線材を用いた 2 本平行配置型超電導式液面計を提案し、有用性を明らかにしてきた[1]。本液面計の特徴は、1) 液の充填時や充填後の自然蒸発時の冷却特性の変化、2) 加圧排出する導入ガスの種類 (GH<sub>2</sub>, GHe)、3) 加圧による液温の変化のようなガス状態に影響を受けにくいことである。本研究では、SS(ステンレス鋼)シース MgB<sub>2</sub> 線材[2]と参照線材の抵抗の温度依存性を計測し、線材を構成する SS 材および MgB<sub>2</sub> コアの抵抗の温度特性を実験的に評価する。また、熱処理の有無が測定される抵抗の大小に与える影響も明らかにする。次に、得られた実験結果を反映した数値シミュレーションを実施し、液面計の出力誤差を評価する。

### 2. 実験

試料線材の諸元を Table 1 に示す。これまでの液面計に使用した線材は in-situ PIT 法で作製されており、SS 管の中に MgH<sub>2</sub> と B の混合粉末を充填して線径 0.1 mmφ まで線引き加工し、630 °C で 5 時間の熱処理を施している。ここでは未熱処理線と熱処理後の SS シース MgB<sub>2</sub> 線をそれぞれ Sample 1, 2 とよぶ。さらに SS 材のみの抵抗を評価するために、熱処理を施していないと想定される線径 0.1 mmφ の SS 無垢線を購入して Sample 3 とし、Sample 2 と同様の熱処理を施して Sample 4 とした。これら試料線材の抵抗を四端子法で測定するため、10 mA の直流通電中の電圧を計測した。試料全体をヘリウムガスで冷却し、cernox 温度計を試料線近傍に設置した。

測定した 4 本の試料線材の抵抗率の温度依存性を Fig. 1 に示す。Sample 3, 4 を比較すると、熱処理した Sample 4 の抵抗率の方が小さい。これは、線引き工程で加工硬化した SS 材を焼きなますことで、結晶のひずみを取り除かれたためであると推定される。Sample 1, 2 についても同様のことがいえるはずであり、SS シースの抵抗率は、線引き加工後の Sample 1 よりも熱処理後の Sample 2 の方が小さいと推定される。そこで、Sample 2 における SS シースの抵抗率が同様の熱処理を施した Sample 4 と同一と仮定すると、Sample 2 における MgB<sub>2</sub> コアの抵抗率  $\rho_{MgB_2}$  を次式により評価できる。

$$\rho_{MgB_2} = \lambda \left( \frac{1}{\rho_w} - \frac{1-\lambda}{\rho_{ss}} \right)^{-1} \quad (1)$$

ここで  $\rho_w$  は Sample 2 全体の抵抗率、 $\rho_{ss}$  は Sample 4 の抵抗率、 $\lambda$  は MgB<sub>2</sub> コアの占積率である。(1)式を利用して求めた  $\rho_{MgB_2}$  の温度依存性を Fig. 1 に実線で示す。MgB<sub>2</sub> コアの常電導抵抗率は、未熱処理の SS 線(Sample 3)よりも小さく、熱処理後の SS 線(Sample 4)よりも大きいことがわかった。

ところで、Sample 4 の抵抗率は、Sample 2 の常電導抵抗率とほぼ同様な温度依存性を示しており、かつ若干低い値をとっている。一方で、これまで液面計用の非超電導線として用

いてきた Sample 1 の抵抗率は、2 倍程度高い値である。したがって、非超電導線として熱処理した SS 無垢線を用いることで液面計の精度を上げることが可能と思われる。

### 3. 数値シミュレーション

実験で得られた各種材料の抵抗率の温度依存性に基づいて近似式を導出し、液面計動作の数値シミュレーションを行った。近似曲線を Fig. 1 に示す。数値計算プログラムコードは、以前構築したものをを用いた[3]。タンク内の操作により、ガスの熱伝達係数、ガス中の温度勾配、液体水素の沸点が変化する。大気圧下において、液体水素が自然蒸発している状態を基準状態とし、a) 液の急速充填、b) 水素ガスによる加圧排出、c) ヘリウムガスによる加圧排出の 3 つの状態を想定し、各パラメータを設定した。基準状態で較正した後に各条件下で生じる計測誤差について、以前の結果[3]と比較検討する。

### 参考文献

1. K. Kajikawa, et al.: Physics Procedia 36 (2012) 1396.
2. Y. Yamada, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. 22 (2012) 6200304.
3. K. Kajikawa, et al.: Adv. Cryo. Eng. 59 (2014) 905.

Table 1 Specifications of Sample Wires

Sample	Composition	Wire Diameter	Volume Fraction of Core	Heat Treatment
1	MgH <sub>2</sub> +B/SS	0.1 mmφ	0.244	—
2	MgB <sub>2</sub> /SS	0.1 mmφ	0.244	○
3	SS	0.1 mmφ	—	—
4	SS	0.1 mmφ	—	○

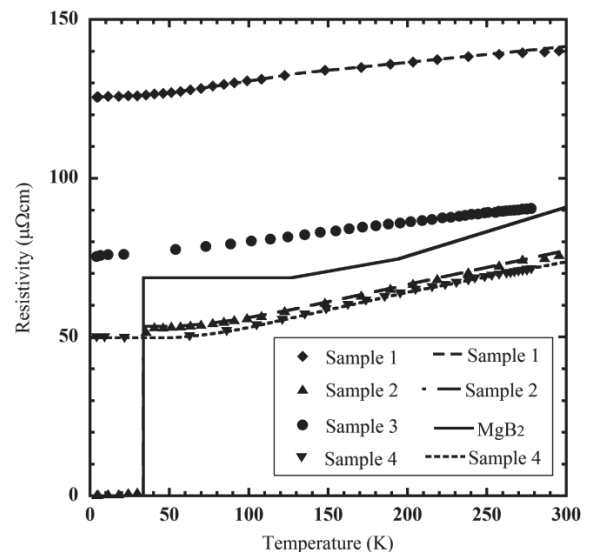


Fig. 1 Comparison between Experimental Results and Approximated Curves of Resistances in Constituent Materials



# 還元剤添加による ex situ 法 MgB<sub>2</sub> 線材の臨界電流密度特性の改善

## Improved critical current density in ex situ processed MgB<sub>2</sub> tapes by the addition of reducing agent

藤井 宏樹, 石戸谷章, 伊藤真二, 小澤 清, 北口 仁(NIMS)  
 FUJII Hiroki, ISHITOYA Akira, ITOH Shinji, OZAWA Kiyoshi, KITAGUCHI Hitoshi (NIMS)  
 E-mail: fujii.hiroki@nims.go.jp

### 1. 序

MgB<sub>2</sub> 線材の  $J$  特性を改善するには、結晶粒間結合の強化が重要である。ex situ 法においては、in situ 法に比べて弱結合の問題が深刻であるが、MgB<sub>2</sub> 粒周囲に付着する MgO 層が、その要因であると考えられる。MgO は Ca 化合物で還元されるが、それは予め混合粉末を粉砕処理することで促進される[1]。今回、粉砕処理条件が生成相や線材試料の  $J_c$  特性に及ぼす影響を調べた。

### 2. 実験

市販 MgB<sub>2</sub> 粉(Alfa Aesar)に対し、Ca(純度 99.99%)、CaC<sub>2</sub>(80%)及びCaH<sub>2</sub>(95%)を、それぞれ 100 :  $x$  ( $x = 0, 1, 3, 6$ )のモル比に混合した。これらの混合粉末の所定量を粉砕処理し、成型後、Ar ガス雰囲気下 700 – 900°C で 1 時間焼結した。粉砕処理には、WC 製容器と 5mm 及び 10mmWC 球を用いた。一方、これらの粉末を充填粉として、PIT 法で Fe シース線材を作製し、Ar ガス気流中で 1 時間加熱処理を施して、評価を行った。

### 3. 結果と考察

#### 3-1. 粉末試料

$x = 0$  では、粉砕処理によって MgB<sub>4</sub> の生成量が増大した。一方、全ての添加物によって MgB<sub>4</sub> 及び MgO の生成量は減少し、MgB<sub>2</sub> と CaB<sub>6</sub> は増加した。種々の焼結試料の MgB<sub>2</sub> の 102XRD ピークと MgO の 220 ピークのプロファイルを図.1 に示す。MgO の相対強度が添加によって減少しており、reference intensity ratio(RIR)法の解析結果でも、MgB<sub>2</sub> の増加と MgO の減少が確認された。

CaC<sub>2</sub> 添加試料における MgB<sub>2</sub> の 110XRD ピークプロファイルと比較すると、5mm 球では、高角度側へのピークシフトは微小であったが、10mm 球では顕著であった。これは  $a$  軸長の縮小を意味し、CaC<sub>2</sub> からの炭素置換反応によるものである。即ち、高エネルギーでの粉砕によって、MgB<sub>2</sub> 粒周囲の MgO 層がより効果的に除去されて活性度が増し、置換反応が促進されたものと考えられる。また、このピークシフトは 800°C 以下では見られず、この温度以下では置換反応が起こらないことが示唆された。

#### 3-2. 線材試料

Fig.2 に 10mm 球で粉砕処理した粉末や、未処理 MgB<sub>2</sub> 粉末を用いた線材試料の 4.2K での  $J_c$ - $B$  特性を示す。粉砕処理によって特性は改善されたが、その度合いは 10mm 球の方が大きく、5mm 球より一桁ほど大きかった。この改善は結晶粒の微細化によるピン留め力の増大や、 $B_{c2}$  の向上によるものと考えられる[2]。また、粉砕処理によって最適加熱処理温度は低下したが、10mm 球の方が 5mm 球よりも低下の度合いが大きかった。

CaC<sub>2</sub> 及び Ca 添加によって、高磁界側での特性は改善されたが、CaH<sub>2</sub> 添加では劣化した。また、いずれの試料でも  $x = 6$  では著しく劣化した。添加試料の最適加熱処理温度は 800°C 前後であったが、上記  $a$  軸長の縮小に関する結果から、CaC<sub>2</sub> 添加による改善は、炭素置換によるものでなく、Ca 添加同様、MgO や MgB<sub>4</sub> の減少や、MgB<sub>2</sub> の増加によるものと考えられる。

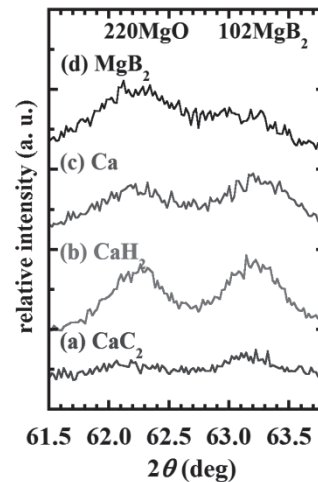


Fig. 1. XRD peak profiles of 102 of MgB<sub>2</sub> and 220 of MgO for sintered MgB<sub>2</sub> powders with the additions of (a) CaC<sub>2</sub>, (b) CaH<sub>2</sub> and (c) Ca with  $x = 6$ , together with the profile for (d) sintered pure MgB<sub>2</sub> powder. The powders were milled with 10-mmWC balls for 2 h and sintered at 800°C.

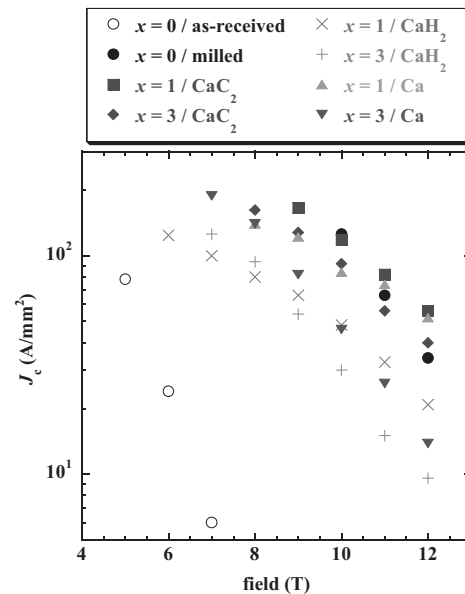


Fig. 2.  $J_c$ - $B$  curves for tapes using ball milled MgB<sub>2</sub> powders with the additives and as-received MgB<sub>2</sub> powder. The ball milling was carried out with 10-mm balls for 2 h. The measurements were performed at 4.2K in a magnetic field applied parallel to the tape surface.

### 参考文献

- 藤井ら:2015 年度春季低温工学・超電導学会 1P-p05.
- A. Malagoli, et al.: J. Appl. Phys., vol. 104 (2008) 103908.

# 高磁場 MRI 用高温超電導磁石開発の進捗(15 年秋) REBCO マルチコイルにおける異常横磁界効果の評価

Progress in the development of an HTS magnet for ultra-high field MRI (2015 autumn)  
- Evaluation of Abnormal Transverse-field Effects in REBCO Multiple Coil -

今市 洋平, 王 韜, 石山 敦士 (早大); 植田 浩史 (阪大);  
宮崎 寛史, 戸坂 泰造, 野村 俊自, 来栖 努 (東芝)

IMAICHI Yohei, WANG Tao, ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.); UEDA Hiroshi (Osaka Univ.);  
MIYAZAKI Hiroshi, TOSAKA Taizo, NOMURA Shunji, KURUSU Tsutomu (Toshiba)  
E-mail: atsushi@waseda.jp

## 1. はじめに

我々は、日本医療研究開発機構 (AMED) の未来医療を実現する医療機器・システム研究開発事業「高磁場コイルシステムの研究開発」で、10T 級 (9.4T) のヒト全身用 MRI の実現を目指している。REBCO 線材はテープ形状を有しているため、テープに対し垂直な磁場の影響を受け、遮蔽電流が顕著に誘導される。その結果不整磁場が発生するため、高精度磁場を必要とする MRI 応用において遮蔽電流の低減が必須課題となっている。そこで今回は、超電導マルチコイルと外部変動横磁界発生用銅ソレノイドコイルを用いて実験を行い、異常横磁界効果による遮蔽電流低減効果を評価したのでここに報告する。

## 2. 実験手順

実験対象となるコイルの諸元を Table 1, 概略図を Fig. 1 に示す。超電導マルチコイルは、内側から DP コイル×1 と SP コイル×2 をスタックし構成している。外部変動横磁界発生用銅ソレノイドコイルは、異常横磁界効果に必要である中心到達磁界以上の磁界 (15A 通電時、52.5mT) を発生可能である。実験は、コイルを液体窒素浸漬冷却にしたのち、実験 I : マルチコイルに 60A 通電し 1 時間ホールド、実験 II : マルチコイルに 60A 通電し 1 時間ホールドしながら交流磁場 (±15A、0.5Hz、1632cycle) を印加、実験 III : マルチコイルに 65A → 60A のオーバーシュート通電し 1 時間ホールドしながら交流磁場 (±15A、0.5Hz、1632cycle) を印加、という手順で行った。各 Hall 素子設置位置において遮蔽電流磁場を測定した。

## 3. 結果・考察

実験 I の結果を Fig. 2 に示す。通電電流 ( $I_{op}$ ) の上昇に伴い、遮蔽電流磁場の影響が増している。 $I_{op}=40A$  で飽和し、 $I_{op}$  = 一定で緩やかに減衰している様子が見て取れる。実験 II の結果を Fig. 3 に示す。実験 I の結果と比較すると、横磁界印加によって遮蔽電流磁場の減衰が顕著になり、異常横磁界効果を確認することが出来た。定量的には、同期間の減衰量が約 1.5 倍になっており、マルチコイルにおいても異常横磁界効果は有効であることを確認した。

Table 1 Coils specification

Superconducting Coil	
Material	Fujikura Ltd. FYSC-SCH05
Tape Width	5 mm
Tape Thickness	0.13 mm
Inner Diameter	100 mm
Outer diameter	129 - 132 mm
Height	DP Coil 16.6 mm
	SP Coil 9.3 mm
Insulation	Winding with Kapton® 25 μm
Number of turns	100 - 109 turns/coil
Coil Ic	SP: 94-108A DP: 95A
Copper Coil	
	Inner / outer copper coil
Diameter of wire	1 mm
Number of layers	4
Inner Diameter	54 / 162.8 mm
Outer diameter	71.4 / 181.6 mm
Height	200 mm
Number of turns	727.5 / 731.5 turns

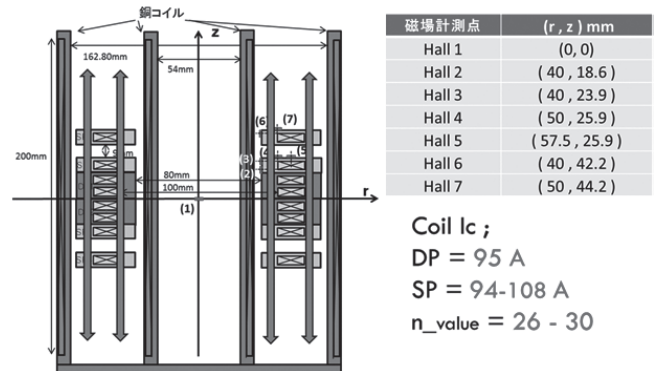


Fig. 1 The schematic drawing of coils as an object for experiment

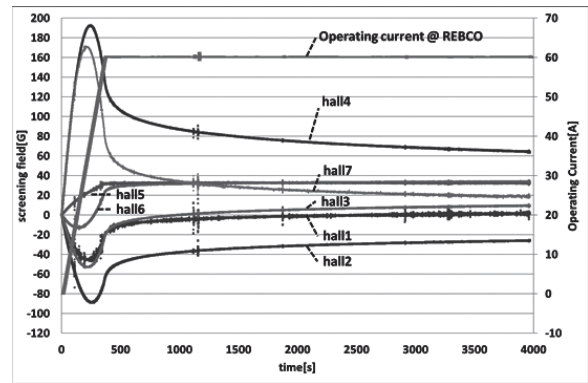


Fig. 2 The decrease of screening field under the normal operation

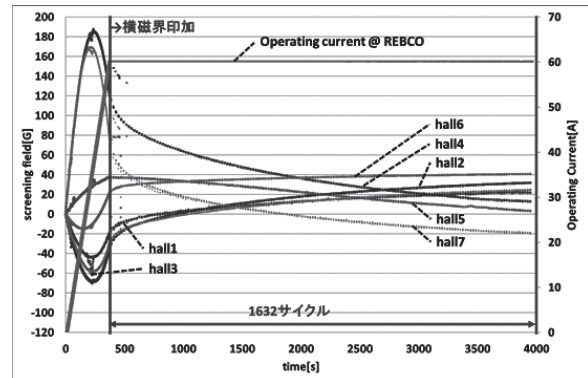


Fig. 3 The decrease of screening field under the abnormal transverse-field effects

## <謝辞>

本研究は、日本医療研究開発機構 (AMED) の未来医療を実現する医療機器・システム研究開発事業「高磁場コイルシステムの研究開発」を通じて実施された。

## 参考文献

1. K. Kajikawa, et al. Supercond. Sci. Technol., vol. 24, no. 12, 125005, Dec. 2011.
2. A. Ishiyama, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 89 (2014) p.153.
3. H. Ueda, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 23 (2013), 4100805.

**高磁場 MRI 用高温超電導磁石開発の進捗(15 年秋)**  
**—REBCO マルチコイルにおける遮蔽電流による不整磁場の評価試験と解析—**  
 Progress in the development of an HTS magnet for ultra-high field MRI (2015 autumn)  
 —Evaluation of Irregular Magnetic Field Distribution Generated  
 by Screening Current in Multiple REBCO Coils —

中園 浩平, 持田 歩, 王 韜, 石山 敦士(早大); 植田 浩史(阪大); 宮崎 寛史, 戸坂 泰造, 野村 俊自, 来栖 努(東芝);  
 NAKAZONO Kohei, MOCHIDA Ayumu, WANG Tao, ISHIYAMA Atsushi (Waseda University);  
 UEDA Hiroshi (Osaka University); MIYAZAKI Hiroshi, TOSAKA Taizo, NOMURA Shunji, KURUSU Tsutomu (Toshiba);  
 E-mail: n.kohei@moegi.waseda.jp

### 1. はじめに

我々は、日本医療研究開発機構(AMED)の未来医療を実現する医療機器・システム研究開発事業「高磁場コイルシステムの研究開発」で、10 T 級(9.4 T)のヒト全身用 MRI の実現を目指している[1]。REBCO 線材はテープ形状であるため、テープ面に垂直な磁場により遮蔽電流が顕著に誘導されてしまう。また、MRI コイルシステムは複数の REBCO コイルから構成されるため、発生磁場が相互に影響し合い、より複雑に遮蔽電流が誘導されてしまう。そのため様々な励磁条件での遮蔽電流の振舞いを調査し、明らかにすることが求められている。今回は、REBCO マルチモデルコイルを製作し、励磁順を変えた場合と、オーバーシュートをした場合の遮蔽電流による不整磁場(以下、遮蔽電流磁場)について実験と数値解析により評価した。また、そのときの中心における磁場均一度に与える影響について評価したので報告する。

### 2. 実験方法

製作したモデルコイルには Fujikura 社製の線材を用いた。線材幅は 5 mm、厚みは 0.13 mm である。また、マルチモデルコイルは内径 100 mm、外径 129-132 mm、巻数 100-109 のシングルパンケーキコイル(SP)およびダブルパンケーキコイル(DP)を Fig. 1 のように重ねて構成した。マルチコイル中心とコイル付近の 5 箇所(1)~(5)を磁場計測点としてホール素子を設置した。

今回、超電導状態の REBCO コイルの発生磁場を Case 1(全コイルを同時励磁)、Case 2 (Inside Coil を励磁し、1 時間後に Outside Coil を励磁)における発生磁場をそれぞれ測定した。Case 1 については、(i) オーバーシュート無し、(ii) オーバーシュートありの 2 種類、Case 2 については、(i) オーバーシュート無し、(ii) Inside Coil のみオーバーシュート、(iii) Outside Coil のみオーバーシュート、(iv) Inside Coil, Outside Coil ともにオーバーシュートの 4 種類の測定を行った。なお、全実験においてオーバーシュートは運転電流 60 A に対し 8.3 % (5 A)とし、スロープレートは 10 A/min とした。

### 3. 解析

REBCO コイル内の遮蔽電流の解析を行うために開発した 3 次元電磁場解析プログラムを用いた[2]。REBCO 線材の厚み方向の電流を無視する薄膜近似を用いた。また、コイルの巻線の 3 次元形状、線材間での磁氣的結合を考慮した。更に、球面調和関数展開を用い、磁場均一度に与える影響を評価した。

### 4. 結果と考察

例として Case 1(i)と Case 2(ii)の実験と解析の結果を Fig. 2 に示す。解析により定量的な誤差は見られるものの、遮蔽電流磁場の振舞いを表現できている。また、Case 2 の結果を見ると 1 回目の励磁により発生した遮蔽電流磁場が 2 回目の励磁により抑えられている事が分かる。詳細は当日報告する。

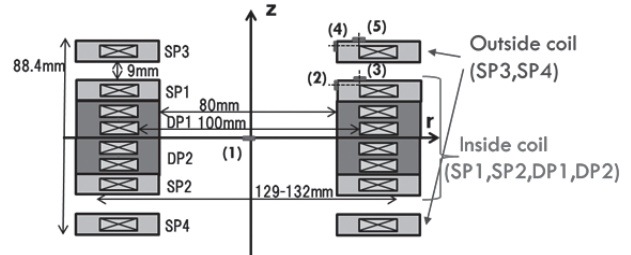


Fig. 1. Schematic layout of the multiple-coil model and measurement point (1)-(5).

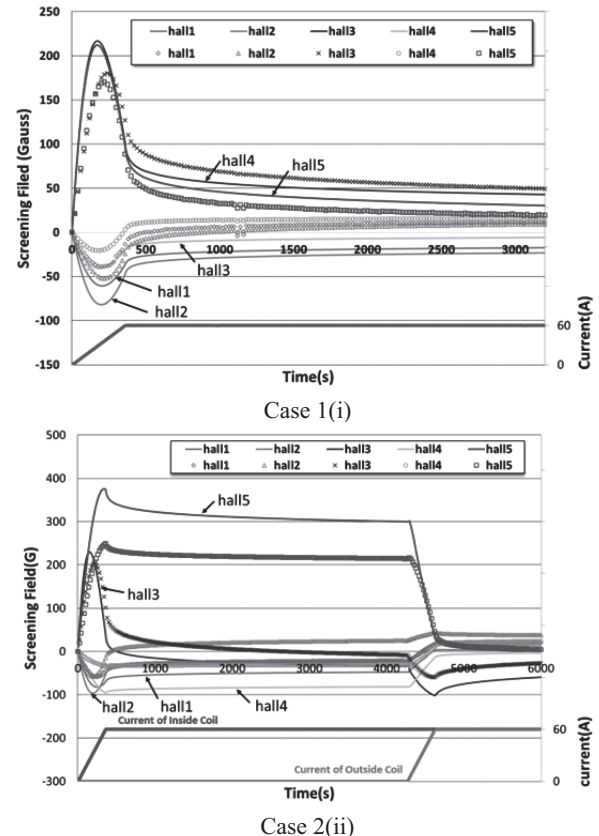


Fig. 2. Experimental and numerical magnetic field generated by screening currents.

### <謝辞>

本研究は、日本医療研究開発機構の未来医療を実現する医療機器・システム研究開発事業「高磁場コイルシステムの研究開発」を通じて実施された。

### 参考文献

1. T. Tosaka, et al.: *Abstracts of CSJ Conference*, Vol.92 (2015) 3B-a01.
2. H. Ueda, et al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 23 4100805 (2013).

# 磁場回転型薬剤送達システムに関する研究

## Study on drug delivery system with rotational magnetic field

竹内 一将, 三島 史人, 秋山 庸子, 西嶋 茂宏(大阪大学 工学研究科),  
本田 貴子, 天満 昭子, 中神 啓徳(大阪大学 医学系研究科)

TAKEUCHI Kazumasa, MISHIMA Fumihito, AKIYAMA Yoko, NISHIJIMA Shigehiro(Osaka University Graduate school of Engineering), HONDA Akiko, TENMA Akiko, NAKAGAMI Hironori(Osaka University Graduate school of Medicine)

E-mail: takeuchi@qb.see.eng.osaka-u.ac.jp

### 1. はじめに

磁場印加型薬剤送達システム(Magnetic Drug Delivery System: MDDS)という治療方法が近年注目されており、盛んに研究がなされている[1]。これは強磁性を付与した薬剤(強磁性薬剤)を患者に投与した後、体外から磁場を印加することで能動的に病巣に薬剤を集積させる手法であり、MDDS による治療効率の向上などが期待されている。しかしながら従来の MDDS では体外の一方からのみ磁場を印加しており、この手法において強磁性薬剤は体表面に集積される。すなわち体内深部に選択的に薬剤を送達することが困難である。

そこで本研究では、磁場を回転させることで磁場の回転軸上のみ強磁性薬剤を集積させる磁場回転型 MDDS の技術を提案する。磁場の回転軸上の血管内では、血管半径方向に大きさが等しく向きが回転する磁気力が働くため、強磁性薬剤は血管内壁に沿って円運動し、集積される。一方、磁場回転軸外では、磁場が大きく変動するため、強磁性薬剤に働く磁気力は変動する。これにより、強磁性薬剤は血管内壁に沿った円運動ができず血流によって押し流される(Fig.1)[2]。

本研究では、磁場回転型 MDDS の技術を開発するという目的のもと、チューブを用いた模擬実験、ラット大動脈を用いた血管実験、血管内皮細胞を用いた細胞実験を行った。本予稿では模擬実験と血管実験の結果について報告する。

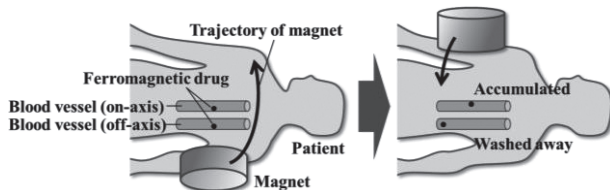
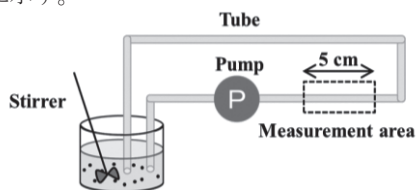


Fig.1 The behavior of ferromagnetic drugs in blood vessels on- and off- axis of rotational magnetic field

### 2. 実験手法

血液の粘性係数を模擬するために 25 wt% PVA 水溶液を調製し、これに模擬強磁性薬剤として直径約 330 nm のマグネイト粒子を懸濁した(鉄イオン濃度:120 ppm)。次に、懸濁液を内径 1.15 mm のチューブおよび内径約 1 mm のラット大動脈内に流速 1 cm/s で流入させ、回転磁場印加、静磁場印加、磁場印加なしの各条件について、測定箇所として設定した 5 cm の範囲の懸濁液を採取した。磁場発生源には、表面磁束密度 400 mT のネオジム永久磁石を使用した。最後に、採取した懸濁液の鉄イオン濃度を ICP-AES(島津製作所)で測定することで、粒子の集積を評価した。血管実験では、栄養血管から漏れ出した懸濁液の濃度も測定した。実験装置の概略図を Fig.2 に示す。



Suspension of magnetite particles  
Fig.2 Schematic diagram of experimental setup

### 3. 実験結果・考察

まず模擬実験に関しては、回転磁場条件における磁場回転軸上で最も鉄イオン濃度が高く、同条件における磁場回転軸外の 9.8 倍、静磁場条件および磁場なし条件の 3.2 倍、21.9 倍の濃度であった(Fig.3 左側 4 サンプル)。この結果から、磁場回転軸上での高効率な薬剤集積の可能性が示唆された。一方、血管実験では静磁場条件で最も濃度が高かった(Fig.3 右側 3 サンプル)。このことから、回転磁場条件でより多くの栄養血管から粒子が流れ出した可能性が考えられたため、漏れ出した懸濁液の鉄イオン濃度を測定した(Fig.4)。

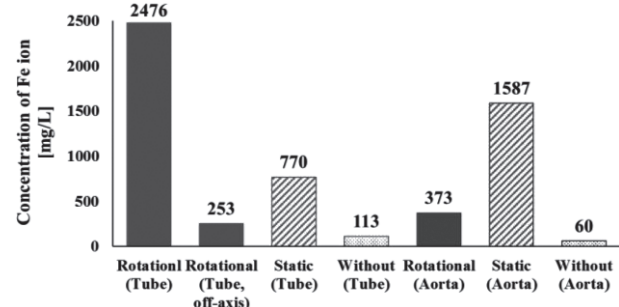


Fig.3 Concentration of Fe ion in measurement area

漏れ出した懸濁液の鉄イオン濃度は回転磁場条件で最も高く、静磁場条件および磁場なし条件の 1.8 倍、2.7 倍であった。さらに、「漏れ出した懸濁液の濃度/標的箇所の懸濁液の濃度」を算出したところ、回転磁場条件、静磁場条件、磁場なし条件の順に 0.42、0.05、0.95 であることから、回転磁場の印加によって、栄養血管外への粒子の流出が促進されたことが示された。以上により、回転磁場の印加によって磁場回転軸上に強磁性薬剤を集積させた後、血管外の腫瘍細胞などの病巣に薬剤を送達することの可能性が示された。

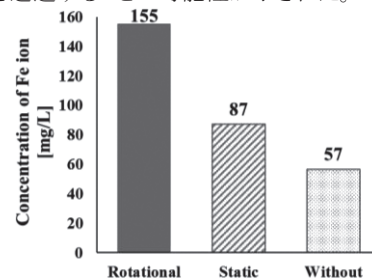


Fig.4 Concentration of Fe ion in leakage

### 4. 今後の展望

今回行った実験系と同程度の条件のもと、血流によるドラッグ力と磁場による磁気力を比較したところ(流速 1 cm/s、粒径 300 nm)、強磁性薬剤の制御に必要な磁場積は  $3.9 \times 10^3$  T<sup>2</sup>/m と算出された。この磁場積を人体の深部で得るためには超電導磁石が必要不可欠であると考えられるため、今後は超電導磁石を使用したシステムの構築に関して検討を進める。

#### 参考文献

1. H.Misak et al, Journal of Biotechnology, Vol.164(2013)130-136
2. M.Chuzawa et al, Physica C, Vol.484(2013) 120-124

# 複数の高温超電導マグネットを用いた MDDS 用磁場制御装置の開発

## Development of magnetic field control system using multiple racetrack HTS magnets for MDDS

中島 淳成, 志摩 翔太, 眞田 尚幸, 平野 亮磨, 中川 拓弥, 金 錫範(岡山大学)  
 NAKASHIMA Atsushige, SHIMA Syota, SANADA Naoyuki, HIRANO Ryoma,  
 NAKAGAWA Takuma, KIM SeokBeom (OKAYAMA University)  
 E-mail: kim@ec.okayama-u.ac.jp

### 1. まえがき

近年の創薬技術の進歩は目覚ましく、その症状に有用な薬物を見いだすことが容易となった。しかし、ほとんどの薬物は本来の効能以外に副作用を有している。そこで、体内の薬物分布を量的・空間的・時間的にコントロールすることで副作用を軽減し、高効率な薬物治療を行う技術が注目されている。このような技術・方法論を薬物配送システム (Drug Delivery System : DDS) という。従来の DDS では、薬物動態を制御するために様々な微粒子に薬剤を抱合するといった薬物の機能化に重点を置いたものが一般的である。我々は、物理的外力として磁気牽引力を用いて薬物を目的の部位に誘導することで、これまでの DDS より効率の良い薬物治療が可能である磁気誘導 DDS (Magnetic Drug Delivery System : MDDS) に注目して研究を行っている。MDDS は、精密に制御された磁場を印加することで薬物を目的の部位に誘導し、高濃度に集積させることができる。これまでに、超電導バルク体を使用することで、バルク体表面から 50 mm の位置においてもナノ磁性体粒子を蓄積できる強度の磁場を発生できることが確認されているが、超電導バルク体は発生磁場を変化させることができないため、精密な磁場制御が困難である。そこで、本研究では、複数の高温超電導レーストラックコイルを用いた新しい概念の MDDS 用マグネットの開発を行っている。

### 2. 提案した MDDS 用マグネットの概念

我々は、複数の高温超電導レーストラックコイルを磁場源として用いることで柔軟な磁場制御が可能であると考えている。そこで、本研究では、長手方向への磁気勾配の形状と強度が制御できる新しい概念の MDDS 用マグネットを提案した。複数の高温超電導レーストラックコイルに、異なる通電電流を通電することで磁場の制御が可能となると考えている。加えて、強磁性体を組み合わせることで、高温超電導レーストラックコイルの自己磁場による通電可能電流の低下を抑えることが期待できる。これは、強磁性体に磁場を誘導することで、コイルにかかる自己磁場による影響を小さくできるためである。具体的には、Fig.1 に示すように高温超電導レーストラックコイルと強磁性体として鉄を組み合わせることで MDDS に有用な磁場の発生が実現できると考えている。

### 3. 数値解析による検討

高温超電導レーストラックコイルと鉄の組み合わせによる通電可能電流の向上効果について検討するために、Fig.1 の2つの解析モデルについて検討した結果、高温超電導レーストラックコイルに磁性体である鉄を配置させることで、Fig.2 の負荷曲線から分かるように、コイルの通電電流を向上させることができた。Fig.2 の負荷曲線中、GdBCO 超電導線材の  $J_c-B-\theta$  ( $ab$ -plane $\perp B$ ) 特性は、液体窒素中で測定したものをを用いた。

次に、異なる電流通電による磁場制御について検討を行った。Fig.3 に示すレーストラックコイルに、異なる電流 (20, 40, 60, 80, 100 A) を通電し、コイル上部 20 mm の位置での磁場について考察した。鉄は、通電電流が最大である右端のコイルのみに配置している。その結果、コイルから離れた位置においても磁気勾配を維持することに成功した (Fig.4)。

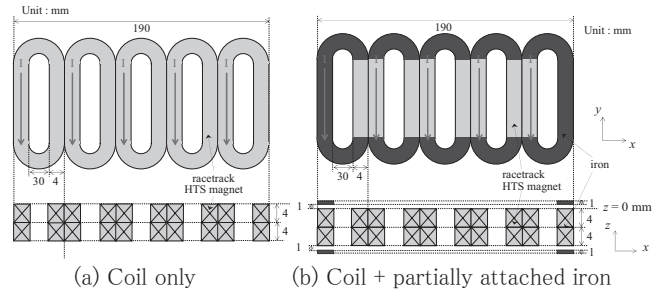


Fig.1 Schematic drawing of analytical model with 2D arranged five racetrack HTS magnets and the combined HTS magnets with irons.

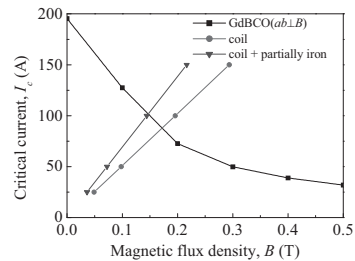


Fig.2 Measured  $J_c-B-\theta$  ( $ab$ -plane $\perp B$ ) profiles of GdBCO wire at L.N<sub>2</sub> and the calculated load-line of racetrack HTS magnets with/without irons (Fig.1 (a) and (b)).

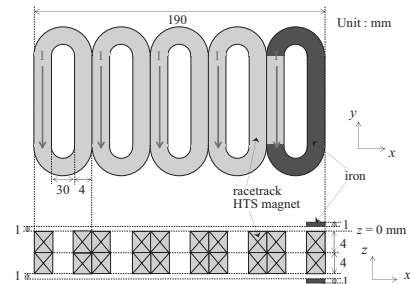


Fig.3 Schematic drawing of analytical model with 2D arranged the five racetrack HTS magnets with partially attached iron on the end of one side.

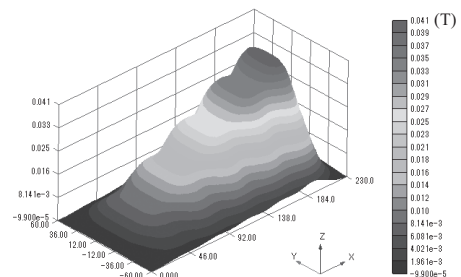


Fig.4 Calculated the magnetic field contour map at a position of 20 mm apart from the surface of racetrack HTS magnets.

# スリット構造を有した積層構造高温超電導バルク体による磁気ターゲティングシステムのための磁場制御法の開発

## Development of Magnetic Field Control Method for Magnetic Targeting System using stacked Slit Configuration HTS Bulks

志摩 翔太, 中島 淳成, 眞田 尚幸, 中川 拓弥, 平野 亮磨, 金 錫範(岡山大学)

SHIMA Shota, NAKASHIMA Atsushige, SANADA Naoyuki, NAKAGAWA Takuya, HIRANO Ryoma, Kim SeokBeom (Okayama University)

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

### 1. はじめに

近年, 再生医療の分野で外部磁場を制御し, 薬や細胞を体内で精密にコントロールすることにより, 体内の必要な部位にだけ薬や細胞を効率的に送り届ける DDS(Drug Delivery System)や, 薬を長時間効くように患部へ集中させる磁気ターゲティングシステムなど新しい再生医療の実現が期待されている. このような治療法の確立のためには, 必要なときにすぐに磁場を印加, ほかの機器を使う際に磁場を遮蔽する磁場の ON/OFF と, 特定箇所のみへの磁場印加が重要な要素となってくる. 本研究では, 高温超電導バルク体 (以下, バルク体と記す) のマイスナー効果による医療用磁場制御方法を開発するための基礎研究として行った.

### 2. 高温超電導バルク体の形状による磁場遮蔽効果

バルク体は, 超電導体本来の特性である完全反磁性を有しているため印加磁場を遮蔽できる能力を持っている. 従って, Fig.1(a), (b)のようなバルク体を用いると, 磁場の遮蔽は可能なものの, 磁場の ON/OFF 制御が難しく, 増幅効果も期待できない. そこで, リング形状のバルク体に Fig.1(c)のようにスリットを入れた形状を検討した. これにより, 磁場遮蔽の原因となる超電導電流がスリット部と中心部に印加磁場と同じ向きの磁場を発生させるため, スリット部での磁場増幅が可能となる. そして, バルク体を回転させることで磁場の ON/OFF 制御が可能となる[1]. 本研究では, スリット構造を有した様々な形状のバルク体を積層することで, 磁場増幅効果および磁場制御能力の向上について検討した.

### 3. 積層構造スリットバルク体の磁場制御特性

リング型の GdBCO 超電導バルク体にスリットを入れたものを用いた実験により, 磁場の ON/OFF 制御と磁場増幅が可能であることを既に確認している. しかしながら, ON 状態と OFF 状態共にリング形状のバルク体の中心部に磁場が印加される問題があった. このような中心部での発生磁場は, 開発する磁気ターゲティングシステムの実現を難しくさせるものである. そこで, 本研究では, ON/OFF 時の磁場の増幅と遮蔽能力を維持しながら中心部での発生磁場を抑えるために, 内径が異なる複数のスリットバルク体の積層構造について検討した (Fig.2). スリットバルク体は, 外径 60 mm, スリット幅 1 mm, 厚さ 5 mm とし, 内径は 5, 10, 15 mm とした. 外径 60 mm, 厚さ 5 mm の永久磁石 (PM) を磁場源とし, バルク体の積層順番を変えることで数値解析を行った. Fig.3 に上部バルク体の表面における ON 状態と OFF 状態の磁場分布結果を示す. Fig.3 より, 最上部に配置されたバルク体の内径が小さいほど ON/OFF の中心部での発生磁場強度が高く, 異なる内径のバルク体を積層する際には, バルク体上部での磁場分布は最上部のバルク体の形状に大きく依存していることが明らかになった. しかし, 最上部のバルク体の内径を 15 mm にすることで中心部の発生磁場強度を磁場源である PM とほぼ同レベルまで抑えることができた. 今後は, 中心部での発生磁場を完全に抑える方法について検討していくつもりである.

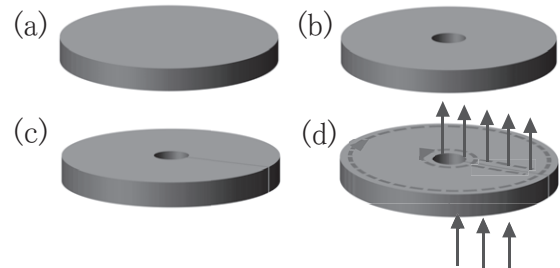


Fig.1 The schematic draw of the various shaped HTS bulks (a) Disc type, (b) Ring type, (c) Slit type and (d) the shielding current in the slit type HTS bulk.

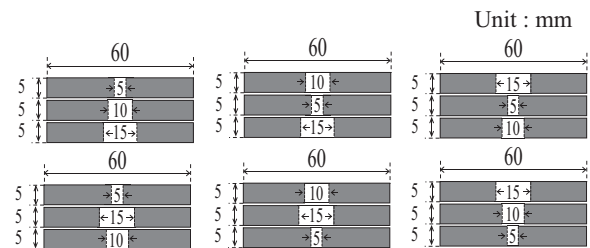


Fig.2 The schematic draw of the stacked slit type HTS bulks with various inner diameters.

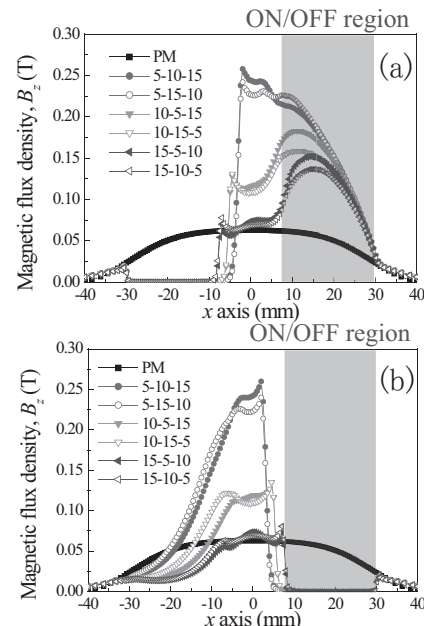


Fig.3 Calculated the magnetic field profiles along the radial direction at top surface of slit type HTS bulk on (a) turn ON state and (b) turn OFF state.

### 参考文献

- S.B. Kim, T. Abe, I. Eritate, M. Takahashi, S. Shima, A. Nakashima, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 25 (2014)

## TFA-MOD 法 YBCO テープ線材を用いた電流リードの開発<sup>⑩</sup> (通電特性と電流分布の評価)

Development of current lead prepared by the TFA-MOD processed YBCO tapes <sup>⑩</sup>  
(Transport performance and current distribution of HTS current lead)

松村 亮佑、中西 雄大、山田 豊(東海大);

高橋 亨、引地 康雄、小泉 勉(昭和電線ケーブルシステム); 田村 仁、三戸 利行(核融合科学研究所)

MATSUMURA Ryosuke, NAKANISHI Yuta, YAMADA Yutaka (Tokai University);

TAKAHASHI Kyo, HIKICHI Yasuo, KOIZUMI Tsutomu (SWCC); TAMURA Hitoshi, MITO Toshiyuki (NIFS)

E-mail:4bazm020@mail.tokai-u.jp

### 1. はじめに

前報 TFA-MOD 法 YBCO テープ線材を用いた電流リードの開発<sup>⑨</sup>では、作製した 2 kA 級超電導電流リードユニットの通電特性と電流分布の評価を行った。その結果、電流がほとんど流れなかったと推定される YBCO 線材が認められた。そこで本報では、新たに作製した 1 kA 級超電導電流リードを試作し、通電特性と、ログスキーコイル及びホール素子を用いて電流分布を評価したので報告する。

### 2. 実験方法

TFA-MOD 法により作製した YBCO 線材は、幅 5 mm、厚さ約 110  $\mu\text{m}$  (Hastelloy substrate: 100  $\mu\text{m}$ 、YBCO layer: 1.5  $\mu\text{m}$ 、Ag layer: 6  $\mu\text{m}$ ) である。77 K における臨界電流:  $I_c$  値 150~190 A の YBCO 線材を並列に表裏各 4 列(計 8 本)等間隔に配置した。Fig. 1 に試作した電流リードの外観及び模式図を示す。YBCO 線材両端を Cu 電極にハンダ接合し、2 枚のステンレス鋼板を、シャントを兼ねた補強材として用いた。電流リード全体の発生電圧  $V_{\text{Overall}}$ 、Cu 両電極と YBCO 線材間の発生電圧  $V_{\text{Cu}(+)}$  及び  $V_{\text{Cu}(-)}$ 、YBCO 各線材の発生電圧  $V_{\text{YBCO}}$  (電圧端子間距離: 170 mm) を測定した。

巻き数 3000 のログスキーコイルを各線材に装着し、電流スイープ時の起電力より各線材に流れる電流を算出し、電流分布を求めた。なお電流のスイープ速度は、200 A/s と 500 A/s で行ったが、スイープ速度の影響は見られなかった。また、市販の廉価なホール素子を各線材に取り付け、通電時の磁場から電流分布を評価した。さらに YBCO 線材を順次 1 本ずつ切断し、その前後の通電  $I_c$  値から切断した線材の  $I_c$  値と電流リード全体の電流分布を調べた。通電試験は核融合科学研究所において行った。

### 3. 実験結果及び考察

Fig. 2 に電流リードの通電結果 (@77 K, s. f.) を示す。液体窒素中・自己磁場下において YBCO 線材に電圧発生することなく 1000 A の通電を達成した。その後、1010 A 通電時に一部の YBCO 線材に電圧が発生し、1080 A でクエンチした。 $V_{\text{Cu}(+)}$  及び  $V_{\text{Cu}(-)}$  は通電電流に伴いほぼ直線的に増加し、200 A/s、1000 A 通電時の  $V_{\text{Cu}(+)}$  は 0.206~0.234 mV、 $V_{\text{Cu}(-)}$  は 0.21~0.23 mV となった。従って接続抵抗は、 $V_{\text{Cu}(+)}$  側では 0.206~0.234  $\mu\Omega$ 、 $V_{\text{Cu}(-)}$  側で 0.21~0.23  $\mu\Omega$  に相当し、低抵抗の接続ができた。なお、(-)側 Cu 電極:  $V_{\text{Cu}(-)}$  が高い YBCO 線材が 1 本認められた。

Fig. 3 に 8 本の YBCO 線材で構成された電流リードの電流分布を示す。電流がほとんど流れていない線材が 1 本認められたが、残り 7 本の YBCO 線材に流れる電流値は、ログスキーコイルで評価した場合、128~179 A、ホール素子で評価した場合、96~187 A と推定された。また、ログスキーコイルとホール素子より推定した電流値の合計はそれぞれ、997 A と 1007 A となり、通電電流値 1000 A に対してほぼ等しい値となった。電流がほとんど流れなかった線材は、Fig. 2 における  $V_{\text{Cu}(-)}$  が高い線材であるため(-)側 Cu 電極の接続不良によるためと考えられる。ログスキーコイルとホール素子を用いることにより電流リード内の電流分布を推定できるものと思われる。

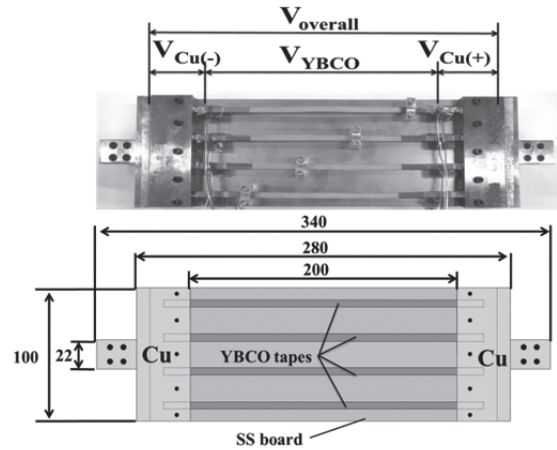


Fig. 1 HTS current lead.

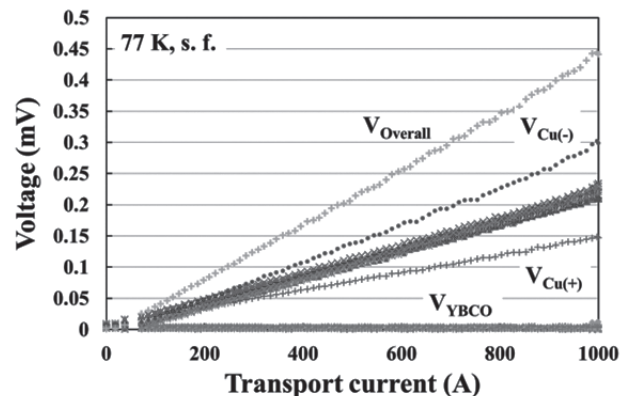


Fig. 2 Transport current performance of the current lead (@77 K, s. f.).

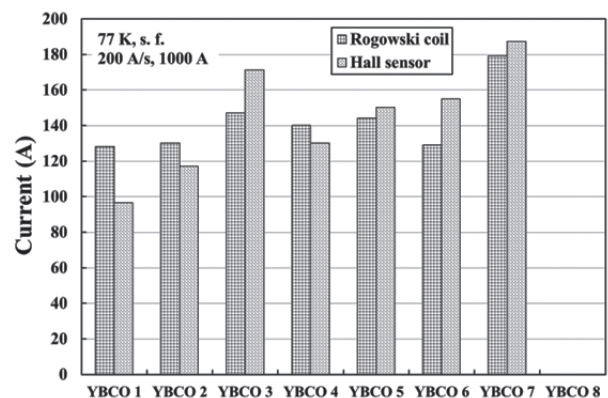


Fig. 3 Current distribution evaluated by Rogowski coils and Hall sensors for the current lead composed of 8 YBCO tapes.

# 極低温環境下で使用する超電導リニアアクチュエータの損失特性

## Loss characteristic analysis of a superconducting linear actuator used in cryogenic environment

広江 貴, 寺地 祐介, 大崎 博之(東大)

HIROE Takashi, TERACHI Yusuke, OHSAKI Hiroyuki (Univ. of Tokyo)

E-mail: hiroe@ohsaki.k.u-tokyo.ac.jp

### 1. はじめに

現在、宇宙初期の天体の成り立ちの解明等のため、巨大地上中間赤外線観測装置の建設計画が進められている[1]。地上中間赤外線観測装置では観測系の中に置いた反射鏡をチョッピングし視野を振ることにより、ノイズを除去する。これは冷却チョッピングと呼ばれ、チョッピング装置は極低温環境下におかれる[2]。そのため、チョッピング用のリニアアクチュエータは低損失であることが要求される。今回、私たちはこのリニアアクチュエータに超電導を応用することを検討し、損失特性解析を行った。

### 2. 解析条件

今回はアクチュエータとしてボイスコイルモータ (VCM) タイプのアクチュエータ (Fig. 1) を採用した。この VCM が 30 K の環境下で Fig. 2 に示す運動をしたときの損失について解析を行った。また、超電導線の損失の比較対象として、RRR (残留抵抗比) が 10 と 100 の銅線についても解析を行った。ケーススタディとして Fig. 1 に示すモデルを基本モデル (体積  $V_1$ ) とし、体積を基本モデルの 2 倍、3 倍と変更し運動物体質量が様々な場合について損失解析を行った。

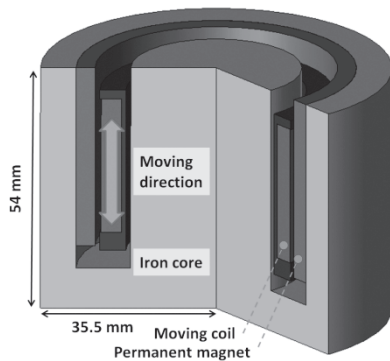


Fig. 1. VCM type linear actuator for the cold chopper.

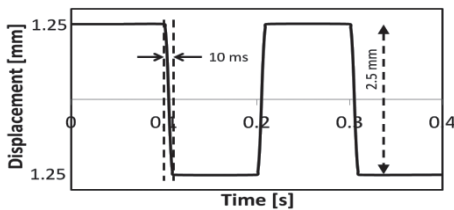


Fig. 2. Typical operation condition of the linear actuator for cold chopper.

### 3. 解析方法

初めに、Fig. 1 に示した VCM モデルのインダクタンスや推力定数を有限要素法によって求めた。そして求めたアクチュエータのパラメータを使用して以下の VCM の運動方程式、回路方程式により運動特性解析を行った。

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} = K_f I - kx \quad (1)$$

$$L \frac{dI}{dt} = V - RI - K_e v \quad (2)$$

ここで、 $M$  は運動物体の質量、 $x$  は運動物体の変位、 $K_f$  は VCM の推力定数、 $I$  は通電電流、 $k$  はバネ定数、 $L$  は VCM の自己インダクタンス、 $V$  は VCM のコイルに印加される電圧、 $R$  は VCM のコイルの抵抗、 $K_e$  は VCM の逆起電力係数、 $v$  は VCM のコイルの運動速度である。位置制御系は電流のマイナーループを用いたカスケード制御系とした。そして最後に運動特性解析によって得られた VCM に通電される電流波形を用いて、有限要素法により VCM の損失解析を行った。

### 4. 解析結果

Fig. 3 に、VCM の損失解析結果を示す。電源の制約によって線材の種類が変わっても通電電流は等しいとして解析を行ったため銅損と交流損失以外の損失は同じ結果となっている。運動物体質量  $M$  が大きくなると通電電流が大きくなるため、損失が大きくなる。また運動物体質量  $M$  が大きくなったとき銅線を使用した場合の損失が交流損失に比べ顕著に増加する結果となった。そのため超電導線を使用すると運動物体の質量が大きい場合に有利となることが分かった。

Table 1 にケーススタディのそれぞれの場合の総合損失を示す。体積が小さくなるほど超電導線材を使用した場合の損失が RRR=100 の銅線を使用した場合より、小さくなる結果となった。そのためアクチュエータの体積に制限がある場合に超電導線を使用するメリットが生まれることが分かった。

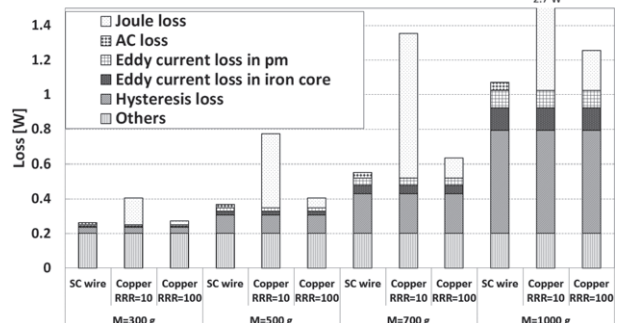


Fig. 3. Analysis results of loss calculation ( $V \neq V_1$ ).

Table 1. A total loss of the VCM actuator (Unit: W).

Volume of the VCM	Kinds of wires	The mass of the moving object			
		300 g	500 g	700 g	1000 g
$3V_1$	SC wire	0.255	0.339	0.461	0.722
	Copper RRR = 100	0.247	0.329	0.453	0.728
$2V_1$	SC wire	0.262	0.359	0.503	0.838
	Copper RRR = 100	0.259	0.361	0.518	0.890
$V_1$	SC wire	0.262	0.368	0.552	1.070
	Copper RRR = 100	0.270	0.404	0.633	1.255

### 参考文献

- [1] Gary H. Sanders, "The Thirty Meter Telescope (TMT): An International Observatory," *J. Astrophys. Astr.* (2013) 34, 81-86.
- [2] T. Nakamura, et al., "Cold chopper system for mid-infrared instruments," *Proc. SPIE*, Vol. 7018 (2008), 70184H.



# 高温超電導バルク体と永久磁石を用いた 非接触型超電導回転機に関する基礎研究

## The fundamental study on the non-contact superconducting rotating machine using HTS bulks and permanent magnets

中村 幸平, 岡村 亮太, 金 錫範(岡山大学)

NAKAMURA Kohei, OKAMURA Ryota, KIM SeokBeom (Okayama University)

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

### 1. まえがき

磁場中冷却(Field Cooling; FC)法により着磁された高温超電導(High Temperature Superconducting; HTS)バルク体は、超電導本来の特性である完全反磁性とバルク体自身に捕捉した磁場を同時に持つようになる。従って、磁場が捕捉されたHTSバルク体は、反磁性体と高温超電導マグネットで構成される Mixed- $\mu$  方式の浮上原理と非常に酷似し、強磁性体を浮上させることが可能となる。そこで、我々は、HTSバルク体を用いた非接触型回転機の開発を行っている。開発する非接触型回転機は、摩擦、摩耗によるエネルギー損失の心配がなくなると共に、これらに起因する粉塵やほこりなどの問題がないため、薬剤を攪拌するための薬用ミキサーでの使用が可能となる。本研究では、リング形状のHTSバルク体を用いた非接触型回転機の回転特性について実験的に検討を行ったので、その結果について報告する。

### 2. 非接触回転機の概要と実験方法

HTS バルク体と永久磁石(Permanent Magnet; PM)と固定子コイルで構成される非接触回転機の概略図を Fig.1 に示す。このシステムは、HTS バルク体の強力なピンニング効果による捕捉磁場と超電導本来の完全反磁性を利用したものである。PM1個をHTSバルク体2個で挟んだ構造を2つ用いた構造となっておりPM自体が直接HTSバルク体を着磁するため着磁用の磁場源が不要でかつシステムを小型化することができる。また、固定子コイル(6極・各極100ターン)と回転子であるPM(3)からなる回転機構をシステム中央に配置することで、浮上させた永久磁石と鉄軸を同期機の原理で回転させることができるため、非接触型回転機として用いることができる。

実験方法として、まず、回転軸をシステムの中で固定した状態から、液体窒素でのFC法によりHTSバルク体をPMによって磁化させる。その後、固定部を取り外すと回転子を取り付けている回転軸は浮上するため、バイポーラ電源を用いて三相交流電流を固定子コイルに通電し、回転磁界を作り出しシステムを回転させる。本研究では、回転数及び軸の安定性の向上を目的とし、回転子の個数、システムの構造を変えた場合の回転数及び軸ブレを測定することで回転機の動的特性について検討した。

### 3. 回転子の個数による最大回転数の測定実験

実験結果の一例として、Fig.1に示すシステムを用いて回転子の個数を1個、2個、3個と変えたときの最大回転数の測定実験結果をTable 1に示す。また、Fig.2に、実験に用いた回転子の写真及び、固定子コイルとのギャップ間7mmと固定子コイルの高さ15mmの範囲内において各回転子の発生磁場を測定した磁場分布図を示す。Table 1よりPMの個数が多いほど最大回転数は増えることが分かる。これは、Fig.2から分かるようにPMが多いほどより磁場を広い範囲に発生できているため回転子と固定子コイルの磁気カップリングが強くなり、回転数が増えても脱調しにくくなったためである。しかし、薬用ミ

キサーに応用するためには2000rpmの回転数が必要であり改善策が必要である。

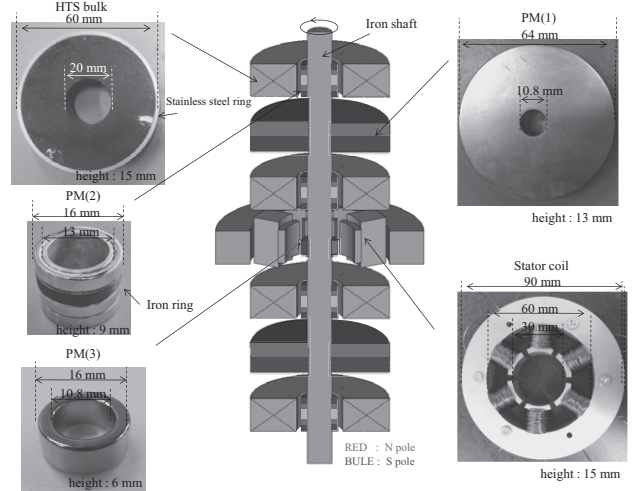


Fig.1 Schematic drawing of proposed non-contact rotating system and photos of the ring shaped HTS bulks, 3 types PMs and stator coil.

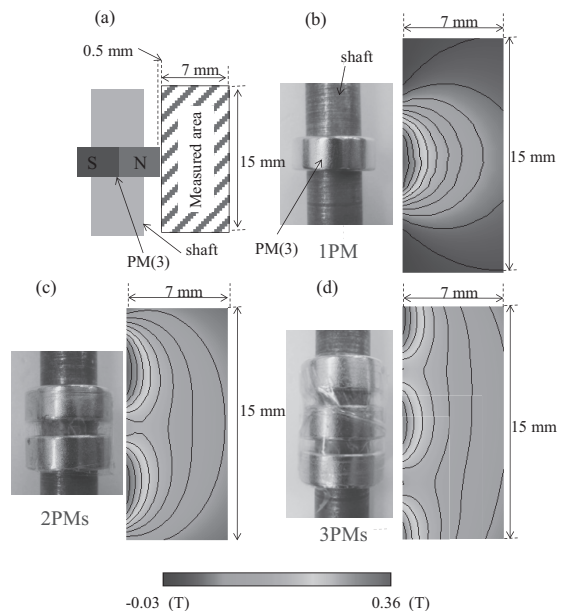


Fig.2 The pictures of various rotors and measured the magnetic field distributions of 3 types of rotors.

Table 1 The measured maximum rotational speed in the experiment used 3 types of rotors.

Rotor	1PM	2PMs	3PMs
Maximum rotational speed (rpm)	600	690	840

## 500kW 全超電導同期電動機的设计検討(1) Design Study of 500kW fully superconducting synchronous motor (1)

田村 亮人, 岩熊 成卓, 佐藤 誠樹, 吉田 幸市 (九州大学);  
長谷 吉二, 富岡 章, 今野 雅行 (富士電機); 和泉 輝郎 (ISTEC)  
TAMURA Katsuhito, IWAKUMA Masataka, SATO Seiki, YOSHIDA Koichi (Kyushu University);  
HASE Yoshiji, TOMIOKA Akira, KONNO Masayuki (Fuji Electric); IZUMI Teruro (ISTEC)  
E-mail; tamura@sc.kyushu-u.ac.jp

### 1. はじめに

同期電動機を超電導化する場合、超電導巻線が鉄心の飽和磁束以上の磁界を容易に発生しうることから、界磁・電機子ともに無鉄心化しう。また同期機は回転界磁子の高磁界化によりギャップ磁束密度を大きく設計でき、無鉄心化による小型・軽量化とともに、損失低減による高効率化も期待できる。これまで同期機超電導化の研究は直流磁界を発生する回転界磁子のみを超電導化する半超電導機が主流であった。本研究では、回転機の究極の小型・軽量・高効率化を図るために、界磁に加えて電機子をも超電導化することを目指している。我々は 500kW 全超電導機について設計検討を行うに際し、磁束密度分布及び交流損失特性について、数値解析により検討した。

### 2. 500kW 級全超電導機電動機の仕様

Table. 1 に想定した全超電導機の仕様を示す。超電導線材としては、厚さ 100  $\mu\text{m}$  の Hastelloy を基板とする幅 5mm、超電導層 1.5  $\mu\text{m}$  厚、銀層 4  $\mu\text{m}$  厚で銅安定化層を加えた全体が 300  $\mu\text{m}$  厚の IBAD-PLD 法 EuBCO テープを想定した。この臨界電流  $I_c$  の温度 T、磁場 B 依存性としては、現在開発されているテープ線材を参考に Fig. 1 を仮定した。BHO 人工ピンニングセンター導入により  $I_c$  の磁場特性向上を図ったものであり、 $I_c=900\text{A}@50\text{K}, 0\text{T}$  である。

### 3. 数値解析

解析には市販の電磁場解析ソフト JMAG を用いた。解析により電動機内の磁場密度分布を計算し、それから得られる界磁巻線及び電機子巻線にかかる垂直磁場分布の振幅と Fig.2 に示す超電導線材の交流損失特性から各巻線に発生する交流損失の値を見積もった。

### 4. 解析結果と考察

解析により得られた磁場分布を Fig.3 に示す。電動機内に発生する最大の磁束密度は 2.6T となった。各巻線に発生する交流損失などその他特性は当日報告する。

Table.1 Specifications of REBCO Superconducting Motor

Output power	500kW
Number of poles	4
Outer diameter	876mm
Effective length	800mm
Gap	2mm
Load factor	0.8

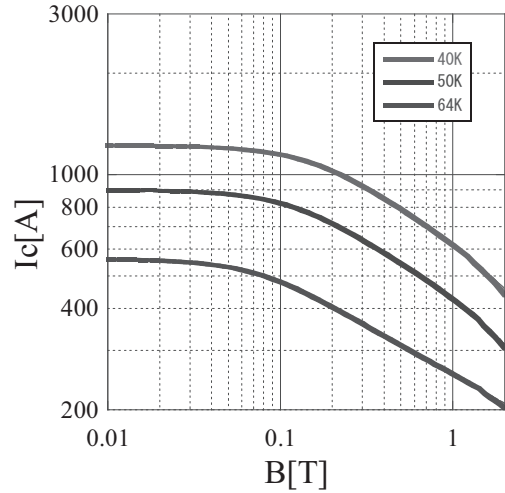


Fig.1  $I_c$ -B characteristics of REBCO tapes

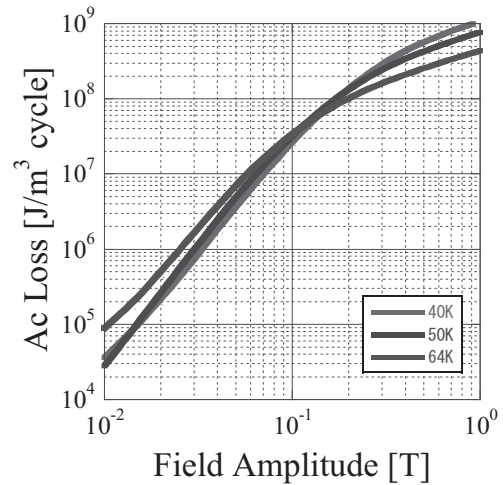


Fig.2 Ac Loss characteristics of REBCO tapes

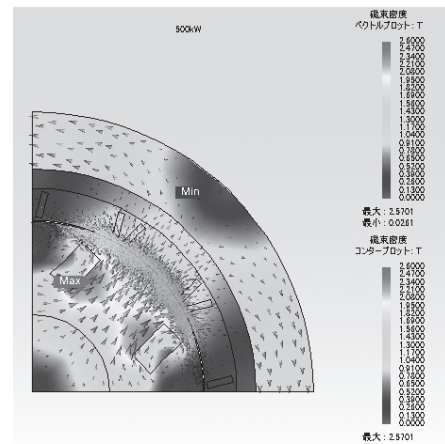


Fig. 3 Magnetic flux density distribution

# 超電導無誘導モーターの研究開発

## Research and development of superconducting non-inductive motor

猪谷 亘希, 佐藤 弘明, 谷中幸春, 寺田 潤哉, 原田 祥太郎, 河村 実生 (岡山理科大学)

INOTANI Koki, SATO Hiroaki, TANINAKA Yukiharu, TERADA Junya, HARADA Shoutaro, KAWAMURA Minaru (OUS)

E-mail: minaru@ee.ous.ac.jp

### 1. はじめに

1960年代ごろから超電導モーター及び発電機の開発が行われてきているが[1]、応用範囲が限定的で、実用性や汎用性が高いとはいえ、超電導の回転機への応用において開発の余地が大いに残されていると考えられる。

我々の研究室では、冷却効率が高く、超電導の抵抗ゼロという性質を最大限に生かすことを可能とする、新しいタイプの超伝導回転機の開発を進めており、試作機を作成し原理検証を行ったので、これについて報告をする。

### 2. 超伝導無誘導モーター

超伝導体の抵抗ゼロの性質を利用すれば、計算上は、既存する超伝導ワイヤーを用いてジェットエンジンやロケットエンジンを超えるような極めて高い出力重量比を有するモーターの開発が可能と考えられる。我々は、これを実現するために無誘導化により、コアを磁束の通り道に使用し、実効的にはコアレスと同等の特性を持つ構造を考案している。そのトルク発生仕組みを図1に示す。図に示されているように、磁性体コアを挟んで永久磁石が対抗して配置されており、磁石から発生している磁束は、コアにまかされている超伝導コイルに垂直にあたり、コイルの中をコアに沿って通過している。磁束と超伝導電流の間にローレンツ力が発生し、その反作用として磁石が力を受け、トルクを発生する仕組みである。

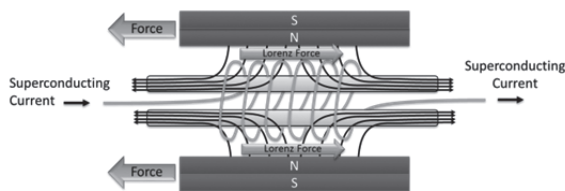


Fig. 1 superconducting non-inductive motor

このような超伝導コイルを図2に示すように同一方向に円平板上のコアに3倍数か所巻き、二相(三相)電流を図のように流すと、お互いのコイルが作る磁束が打ち消しあうため無誘導化が行われ、自己インダクタンスが理想的にはゼロとなる。この無誘導化により、固定子(コアなど)で発生するヒステリシス損失や渦流損が無くなり、磁気飽和の問題も回避可能であることが理解される。また、これと同時に、超伝導コイルの自己磁場が打ち消されるため超伝導ワイヤーの臨界電流の低下の抑制や交流損失の低減を可能としている。

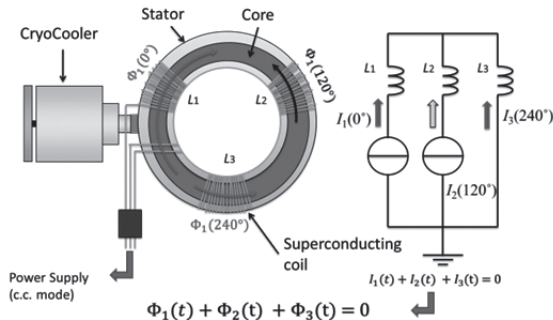


Fig. 2 Cancellation of magnetic flux in core

図3に今回試作したモーターの構造の概略を示す。モーター容器内は断熱のため真空中に引かれており、軸は磁性流

体シールベアリングを利用して大気中に引き出されている。固定子は熱伝導の高い金属で作られており、磁性体コアが両面に埋め込まれている。これに、超伝導ワイヤーが巻かれており、固定子の金属を介して冷凍機で冷却する構造となっている。冷凍機にはSunPower社製の高性能小型クライオクーラー(CryoTel GT)を使用している。この固定子は、スーパーエンジニアリングプラスチック(PBI)で容器に固定されている。

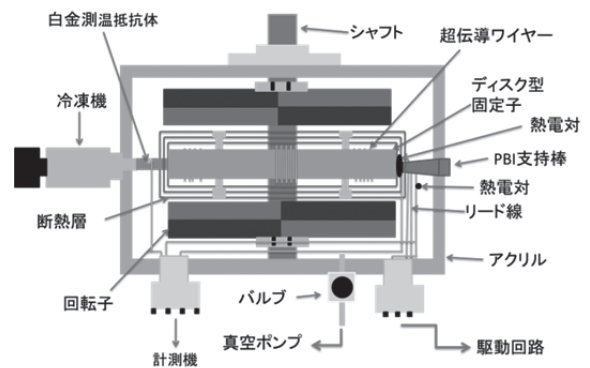


Fig. 3 structure of the superconducting motor

### 3. 検証実験

原理検証を行うため、トルク 2[Nm]、回転速度 60rpm という低トルク、低回転速度の条件下で超伝導モーターの皮相電力の測定を行った。その様子を図4に示す。その結果、超伝導モーターは、図に示されているように、ほぼ、なされた仕事量と皮相電力が等しく、無誘導化されていることが確認された。比較のため、誘導モーターについても測定を行ったところ、無効電力が87%と計測され、その差は歴然としている。

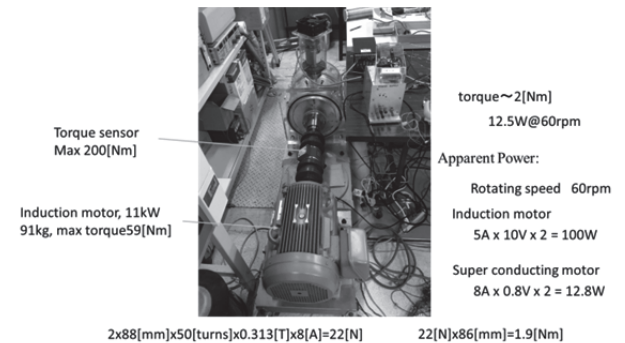


Fig. 4 Investigation of non-inductivity

### 4. 応用先

この超伝導モーターは回転速度に依存しない特性を持っており、最大トルク制御および、最大効率制御、最大力率制御を同時に可能である。このため、低速・高トルク用途の船舶分野だけではなく、高速回転用および、ブレーキング時の回生エネルギーを効率よく回収できる特性を生かした、大型自動車、高速鉄道、高速エレベーターへの応用が期待できる。また、これまで電気モーターでは不可能であった高い出力重量比が要求される航空分野への応用も期待できる。

### 参考文献

1. 100 YEARS OF SUPERCONDUCTIVITY, edited by Horst Rogalla and Peter H. Kes, CRC Press (2011)

# TREK 実験用超伝導トロイダル磁石システムの冷却試験結果

## Cool down test results of superconducting magnet system for TREK experiment

大畠洋克, 荒岡修, 飯尾雅美, 飯田真久, 五十嵐洋一, 今里純, 大中正政, 岡村崇弘, 荻津透, 佐々木憲一, 清水俊, 榎田康博, 吉田誠 (KEK)

Hirokatsu Ohhata, Osamu Araoka, Masami Iio, Masahisa Iida, Yoichi Igarashi, Jun Imazato, Masaya Oonaka, Takahiro Okamura, Toru Ogitsu, Ken-ichi Sasaki, Suguru Shimizu, Yasuhiro Makida, Makoto Yoshida  
E-mail: ohhata@post.kek.jp

### 1. 緒言

高エネルギー加速器研究機構では主に2012年度から2014年度の間、高強度中間子ビームを利用し、K<sup>+</sup>の電子とミューオンへの二体崩壊の精密測定により、レプトン普遍性の破れを探索することを目的としたTREK(E36)実験のための冷却システムの構築を行ってきた。この冷却システムは大別して“ヘリウム冷凍機”、“圧縮機”、“超伝導トロイダル電磁石”から構成され、これらは1989年に筑波キャンパスで使用され2004年廃止したもので、いくつかの深刻な問題を抱えていたものをおよそ2012年度から3年かけて再構築を行った。2014年度末にほぼ予定通りのスケジュールでシステムが完成して以降、2015年度は試運転、完成検査を経て現在は物理実験を実施中である。以前本学会において、冷却システムの概要ならびに構築方法について報告を行っている。本報ではシステム再構築からシステム試運転結果について報告する。

### 2. 冷却システムの構成ならびに再構築指針

超伝導トロイダル冷却系の概要について、システム構成をFig.1に、また冷却系の主要パラメーターについてTable 1にまとめている。Fig.1の中の中圧タンクならびにヘリウム圧縮機、冷却塔はハドロン実験施設地上部に設置されており、Helium冷凍機、超伝導トロイダル磁石はハドロン実験ホール内に設置されている。地上設備と地下設備の間は、高圧ライン、低圧ライン、クエンチ放出配管、計装空気配管(Fig.1中では省略)の4本により結びされており配管距離は約70mである。冷凍機と超伝導トロイダル磁石の間は、シールドライン、4K二相流の供給・戻り用の長さ2m程度のトランスファーチューブが敷設される。冷却システムの構築にあたり、(1)コスト低減、(2)次期物理実験(COMET実験)へのスムーズな流用、(3)安定な運転の実現を目指し再構築シナリオを確立させた。システム構築にあたっては、流用品、新規開発もしくは新規調達品についてTable 2にまとめているが、この中で再利用可能か否かの調査並びに判断は予算の関係からKEKにて行い、問題点が見出された場合には製造メーカーと技術的協議を行い基本戦略を構築してきた。また表中のyが付いている部分はKEKにて主導的に仕様決定(詳細設計・プログラムデバッグ)した項目である。作業内容は多岐にわたるが特筆すべき事項をまとめると以下の通りである。

- 冷凍機の断熱膨張タービンの腐食が見られた。T1は回転試験で健全性を検証し、T2については新品に交換した。
- 制御系は従来の制御システムであるSATTCONから大陽日酸により開発されたDeMPICSに入れ替えた。これによりJ-PARCの他の施設と同様の制御システムとなり、他の冷却設備をも含めた統合監視を可能とするシステムを構築した。
- DeMPICSの制御プログラムの基幹部分について、SATTCONからの移植は冷凍機メーカーに依頼した。一方で各種運転モードにおける制御プログラムのデバッグは、KEKが主体となり模擬的シミュレーションを実施することで実運転前に全てプログラムバグを取り除いた。

### 3. 冷却試験結果

Fig.2にマグネットの冷却時のトレンドを示している。マグネット冷却は冷却開始からおよそ60H程度で到達することを確認した。また冷凍能力もシールド熱負荷が400W時において130Wの冷凍能力があることを確認し、冷凍機単体としても性能の劣化が無い

ことを確認した。その他クエンチ試験ならびに停電模擬試験においても、システムの健全性を確認すると共に再冷却も自動で定常冷却状態に到達することを確認した。

Table 1. Cryogenic load and required parameter for E36.

熱負荷 @ 4.5 K	15 W
熱負荷 @ 80 K	250 W
カレントリード冷却流量	0.3 g/sec
コールドマス @ 4.5 K / 70 K	2.7 ton / 0.65 ton
冷却配管 ID / 配管総長	12 mm / 60 m
冷却方式 / 質量流量	二相流強制循環 / 7 g/sec
シールド冷却 / 質量流量	ヘリウムガス / 35 g/sec

Table 2. Brief strategy for recycled or newly manufactured components

再利用	圧縮機, 冷凍機, 超伝導トロイダル磁石 中圧タンク, TRT
新規品	冷却塔, バルブユニット†, 計装圧縮機 Helium 常温配管†, クエンチ放出配管†
新規制御系	圧縮機制御盤†, 冷凍機制御盤† 制御プログラム†, マグネット制御盤†

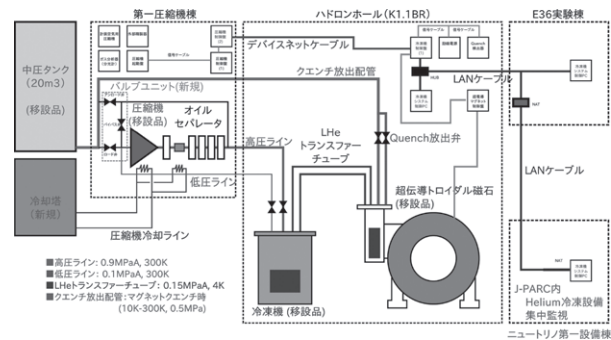


Fig. 1 Cryogenic architecture on toroidal superconducting magnet system for E36 experiment

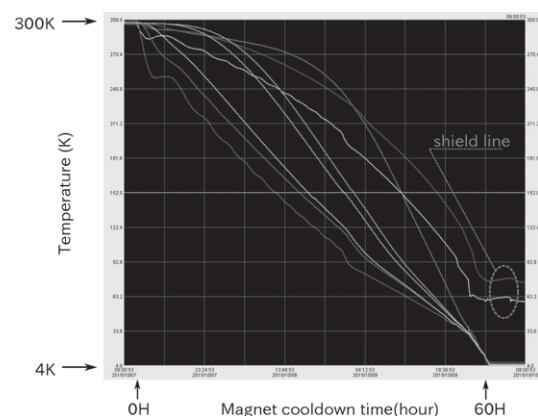


Fig. 2 Cool down curve

# EPICSをベースとしたBELLE II冷凍システム用リモートモニタリングシステム 開発の現状

## Development of the remote monitoring system based on EPICS for the BELLE II cryogenic system

青木 香苗, 岩崎 昌子, 川井 正徳, 近藤 良也, 榎田 康博(KEK); 廣瀬 雅哉(関東情報サービス); 中村 卓也(三菱電機 SC); 遠藤 友哉(日立プラントメカニクス)

AOKI Kanae, IWASAKI Masako, KAWAI Masanori, KONDOU Yoshinari, MAKIDA Yasuhiro (KEK); HIROSE Masaya (Kanto Information Service); NAKAMURA Takuya (Mitsubishi Electric System & Service); ENDOU Tomonari (Hitachi Plant Mechanics)  
E-mail: kanae.aoki@kek.jp

### 1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構(KEK)では、次期計画として2018年の物理実験の開始を目指して SuperKEKB 加速器及び Belle II 測定器の建設を進めている。

我々は、加速器と測定器共同で、ビーム衝突点近傍の Belle II 測定器用超伝導ソレノイド電磁石(Belle ソレノイド)及び SuperKEKB 加速器最終収束系超伝導電磁石システム(QCS)のヘリウム冷凍システム用リモートモニタリングシステムの開発を行ってきた[1][2]。このシステムは、オープンソースソフトウェアの集合体である EPICS (Experimental Physics and Industrial Control)[3]をベースとしている。

Belle ソレノイドとそのヘリウム冷凍システムは、1997年に建設され2010年6月まで14年間の連続運転を行った装置に改良を加えたものである。2016年からの連続運転を目指して整備されてきたが、9月に単体での試運転、励磁を行って、リモートモニタリングシステムを含む装置の健全性と性能を確認した。

### 2. 超伝導電磁石とヘリウム冷凍システムの構成

KEK 筑波実験棟の衝突点に Belle ソレノイド、加速器ビームラインの左右に2台のクライオスタットに分かれて QCS 超伝導電磁石群(QCS-L、QCS-R; ビーム衝突点用超伝導4極電磁石と超伝導補正磁石群から成る)が設置される。

これらは、クライオスタット毎に Belle ソレノイド、QCS-L 及び QCS-R 用に分かれて、3台のヘリウム冷凍機で冷却され、超伝導状態が維持される。

これらの冷凍運転の制御に当たっては、(株)日立ハイテクソリューションズ社製の総合計装システム EX-8000 が採用されている。3台のヘリウム冷凍機とクライオスタットは、それぞれが EX-8000 の MLC(Multi-Loop-Controller)で独立に制御されるが、これら3台の MLC は data highway という共通のバスを持ち、EX-8000 のその他の装置を共有している。その共有している装置の一つに GWU(Gate Way Unit)がある。

我々が開発したリモートモニタリングシステムは、この GWU を介して、EX-8000 の3台の MLC のデータを吸い上げて、一般的なネットワークにおいても超伝導電磁石とヘリウム冷凍機の状態をモニター可能としたものである。

### 3. リモートモニタリングシステムソフトウェアの構成

EPICS は、分散化されたプログラム構造を持つリアルタイムコントローラーを実現するソフトウェア集合体である。我々の開発したリモートモニタリングシステムも、その構成に則って次の要素から成り立っている。

- EPICS IOC (IO Controller)
- データベース(CSS [Control System Studio] アーカイバー+データベース管理ソフトウェア)
- CSS モニタークライアント

データベースへのアクセスのし易さとセキュリティの問題を回避するため、加速器制御用ネットワークと KEK 機構内ネット

ワークの双方からモニター可能とした。データベース用サーバーは、それぞれのネットワークに1台ずつあり、同じデータを蓄積している (Fig.1)。

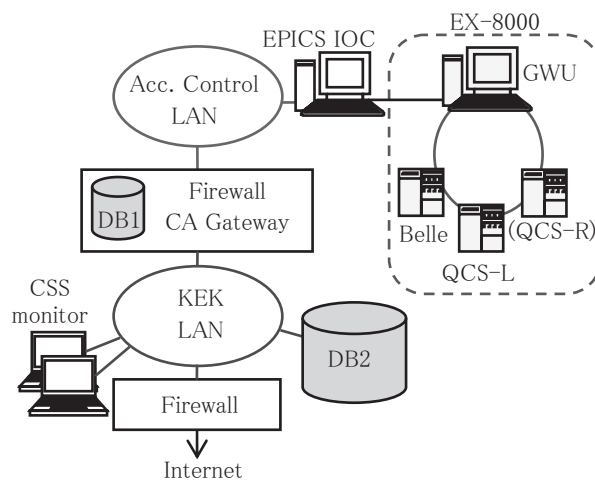


Fig.1 Schematic view of the remote monitoring system

### 4. Belle ソレノイド単体試験で確認された性能

Belle ソレノイドとそのヘリウム冷凍システムに対して、改造の成果と健全性の確認のため、加速器ビームラインからサービスエリアにロールアウトした状態で、9月8日から25日にかけて室温からの冷却と励磁の単体試験が行われた。

リモートモニタリングシステムは、Belle ソレノイド側データと、運転はしていないが QCS-L 側データを同時に収集した。結果は10秒サイクルでの収集、モニターが可能であった。今後 QCS-R 側のデータが追加された場合には、収集サイクルは10秒以上になることが予想される。

さらに、個々の PC で CSS モニタークライアントを起動して、EX-8000 上のデータとの比較確認、及び(有線、無線)ネットワーク上での動作、VPN 接続での動作、作成したグラフ及びグラフィック画面の確認を行った。

### 5. まとめ

ビーム衝突点近傍の超伝導電磁石とヘリウム冷凍機群のリモートモニタリングシステムの開発を行っている。Belle ソレノイド単体試験において、当初の目的とした機能が実現できることを確認した。学会においては、このシステムの現状における構成と確認された機能の詳細を報告する。

### 参考文献

1. M. Iwasaki, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 88 (2013) p.115
2. M. Iwasaki, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 90 (2014) p.200
3. EPICS, <http://www.aps.anl.gov/epics/>

# Y系線材を用いた回転ガントリー用モデル磁石のための磁場測定装置の開発

## Development of the measurement system for the magnetic field of the gantry magnet made of Y-based superconductors

鈴木研人, 荻津透, 菅野未知央, 中本建志 (KEK); 石井祐介, 小柳圭, 高山茂貴, 田崎賢司 (東芝); 雨宮尚之 (京大)  
 SUZUKI Kento, OGITSU Toru, SUGANO Michinaka, NAKAMOTO Tatsushi (KEK); ISHII Yusuke,  
 TAKAYAMA Shigeki, TASAKI Kenji (Toshiba); AMEMIYA Naoyuki (Kyoto Univ.)  
 E-mail: kentsuzu@post.kek.jp

### 1 はじめに

重粒子がん治療のための回転ガントリーの建設にあたって、その装置の規模の大きさが課題の一つとなっている。装置全体の小型化を可能にするため、我々は高温超伝導体である Y 系線材をガントリー磁石に用いる事を検討しており [1]、現在試験用二極磁石の製作を行っているが、並行して磁場性能評価のための装置開発を行っている。試験用磁石の目標磁場均一度である  $10^{-3}$  よりも良い精度で磁場を測定する必要があるため、回転コイルを用いた磁場評価を行う [2]。また、本測定では Y 系線材がもたらす、超伝導体を流れる遮蔽電流の減衰などによる磁場変動を測定できるように、磁場のサンプリングレートを 10-100 Hz に設定する予定である。従って、コイルの回転数を 10-100 /s とした場合にも対応できる速い読み出し系を構築する必要がある。本発表では、測定装置の概要、予測される測定感度、及び開発状況について発表する。

### 2 測定概要

測定方法は 1) 試験用二極磁石をクライオスタット内に収納・冷却、2) 回転コイルを磁石中心へ挿入、そして 3) 得られる信号から磁場成分を評価する、という流れである。測定装置の概略図を Fig. 1 に載せた。コイルは幅 10 mm・全長 50 mm のものを 3 つ (A、B、C) 並べ (Fig. 1 参照)、各コイルから得られる電圧信号を適当な ADC (ここでは SAR ADC を想定) によってサンプリングし、磁場を多極展開した際の各極成分の大きさを評価する事で、磁場均一度を求める。具体的には、コイル A の電圧信号 (dipole 信号) から 2 極成分を、コイル B と C の電圧信号の差 (bucking 信号) から 4 極以上の成分を測定する事になる。例として、時刻  $t$  における 1 つの回転コイルからの信号を以下に示す：

$$V_{dipole}(t) = F \sum_n \left[ \left( \frac{r_2}{r_0} \right)^n - \left( \frac{r_1}{r_0} \right)^n \right] \times [b_n \sin(n\omega t + n\delta) + a_n \cos(n\omega t + n\delta)],$$

ここで、 $F$  は回転コイル長、巻数、回転速度 ( $\omega$ ) 等を含む係数、 $r_0$  は磁石コイルの参照半径、 $r_1, r_2$  は軸方向における磁石中心に対する回転コイル幅の両端位置、 $\delta$  は  $t=0$  における回転コイルの角度位相、そして  $a_n, b_n$  はそれぞれスキュー、ノーマル成分の  $2n$  極を表す。例えば Dipole 成分は  $n=1$ 、quadrupole 成分は  $n=2$  に対応する。

### 3 読み出し装置に対する要求

コイル回転数を 100 /s とした際に、ADC のサンプリングレートを 50、100、500 kHz、そして 1 MHz と変えていった時の磁場の各極成分の測定感度を Fig. 2 に示した。この図は  $b_1=1$ 、 $b_{n(\geq 2)}=10^{-4}$ 、そして  $a_{n(\geq 1)}=10^{-4}$  とした場合に得られる信号から ( $\equiv b_{n0}, a_{n0}$ )、解析する事で得られる成分 ( $\equiv b_n, a_n$ ) との差の絶対値をプロットしたものである。この結果より、サンプリングレートが 500kHz 以上の場合、全ての極成分に対して入力した値からのずれは  $10^{-3}$  以下である事が分かった。また、ADC のランダムノイズ、回転振動による影響等の系統誤差が加わった場合においても、この結果は変わらなかった。

### 4 まとめと今後

Y 系線材を用いた試験用二極磁石の磁場評価のための設計を行っている。読み出し系においては、サンプリングレート

が 500 kHz 以上の場合、目標精度  $10^{-3}$  に達している事が分かった。今後は適当な ADC の選定、読み出し系の構築、そして装置完成を目指す。

### 謝辞

本研究は、日本医療研究開発機構の未来医療を実現する医療機器・システム研究開発事業「粒子線ビーム経路部・照射部用コイル」を通じて実施された。

### 参考文献

- [1] S. Takayama *et al.*, Physics Procedia, vol. 67 (2015) p.879
- [2] L. Walckiers, CERN Accelerator School CAS 2009: Specialised Course on Magnets, Bruges, 16-25 June 2009, <http://arxiv.org/abs/1104.3784v1>

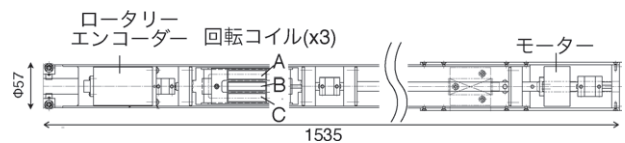


Fig. 1: Schematic drawing of the measurement system.

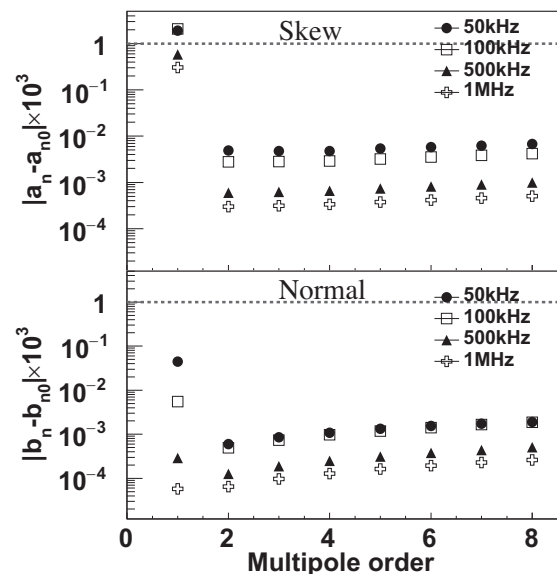


Fig. 2: Sensitivity to the multipole coefficients for skew (top) and normal (bottom) mode when rotating the coil at 100 turn/s. Dotted lines represent the requirements below which measured multipole coefficients must lie.

# YOROI 構造(SUS304)を適用したサイクロトロン超電導マグネットの変形解析と発生磁場精度の評価

## Deformation analysis and evaluation of magnetic field accuracy in cyclotron superconducting magnet with YOROI structure using SUS304

柏崎 裕司, 辻 義明, 石山 敦士, 山川 宏(早大); 王 旭東(KEK); 植田 浩史(阪大); 渡部 智則, 長屋 重夫(中部電力)  
 KASHIWAZAKI Yujii, TSUJI Yoshiaki, ISHIYAMA Atsushi, YAMAKAWA Hiroshi (Waseda University); WANG Xudong (KEK);  
 UEDA Hiroshi (Osaka University); WATANABE Tomonori, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power Co., Inc.)  
 E-mail:atsushi@waseda.jp

### 1. はじめに

我々は、高温超電導技術を応用した医療用超電導サイクロトロンの開発を目指している。この超電導サイクロトロンは、等時性磁場発生用の円形スプリットコイル(SMC)と周方向に強弱をもつ磁場(AVF)を発生させるためのスパイラルセクターコイル(SSC)によって構成され、高精度の磁場分布を必要とする。しかし、巻線に発生する電磁力によってコイルが変形し、磁場精度を満足することが難しい。そこで、先行研究で開発した高機械強度 REBCO パンケーキコイル構造(YOROI 構造)を各コイルに適用し[1-3]、SUS304 で構成された YOROI 構造における磁場精度を数値解析により検証したので報告する。本研究は科研費(基盤研究 A, No.26249036)「次世代医療用サイクロトロン開発のための 5H 超伝導コイルシステムの基盤技術の確立」において実施したものである。

### 2. 解析モデル

SMC と SSC の概略図を図 1 に示す。また、超電導サイクロトロンと各コイルの設計磁場を図 2 に示す。3次元数値解析により超電導サイクロトロンの発生磁場を考慮した各コイルの電磁力を求め、その結果を用いて YOROI 構造を適用した各コイルの構造解析を行った。補強材料は実運転時の中性子照射を想定し、放射特性に優れ、強度もある SUS304 について評価した。SUS304 は冷却時の熱収縮が大きいため、熱応力解析も行った。また、電磁力と熱収縮による変形後のコイルについて、磁場精度を評価した。電磁応力と熱応力解析に用いた SMC と SSC の YOROI 構造の概略図を図 3 に示す[2, 3]。SMC の側板の厚みを 3 mm、外枠の厚みを 40 mm とし、SSC の側板の厚みは 50 mm とした。巻線部は複合則により Hastelloy、銅層と絶縁層(それぞれ厚み 100 μm)の一体モデルとした。YOROI 構造の補強材隣接面は接着条件、補強材と巻線は接触条件とした。境界条件は、補強材の底面の z 方向変位と巻線最内層表面の回転を固定とした。

### 3. 解析結果

YOROI 構造を適用した SMC と SSC の設計磁場に対するコイル変形後の発生磁場誤差を図 4 に示し、最大誤差とビーム引き出し点(r=1.06 mm)における誤差を表 1 に示す。また、熱応力と電磁応力による最大変位を表 2 に示す。

SMC では、コイル 1,2,4 の設計磁場に対する誤差は 1%程度に収まっている。熱収縮による変位は、5.87 mm から 7.57 mm で、電磁力による変位は、1.76 mm から 2.75 mm であり、コイルとしては室温時の形状より収縮することとなる。コイル 3 は巻線形状が扁平であるため、他の SMC よりも 1 桁程度誤差が大きくなったと考えられる。そのため、コイル 3 の巻線形状や補強構造の再検討が必要である。

SSC は図 2 に示すように、他のコイルに比べ、磁場勾配が大きく、複雑な分布であるため、わずかな変位でも磁場精度に大きく影響を与えていることが考えられる。

今後は、補強構造も含めた磁場精度確保のためのコイル設計の再検討を行っていく予定である。

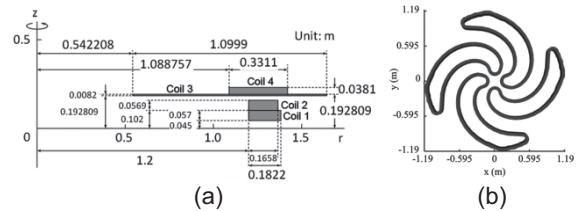


Fig. 1 Schematic drawing of (a) the cross-sectional view of the split main coils and (b) the top view of spiral sector coils

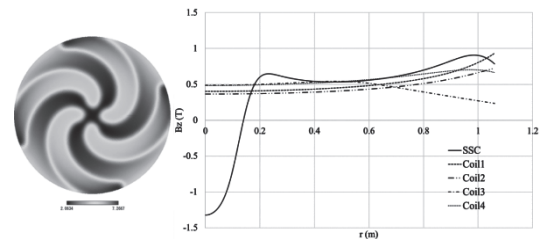


Fig. 2 Ideal magnetic field

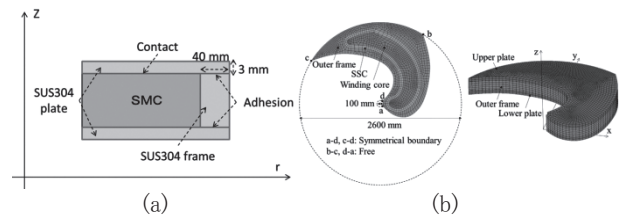


Fig. 3 YOROI structures of the (a) SMC and (b) SSC

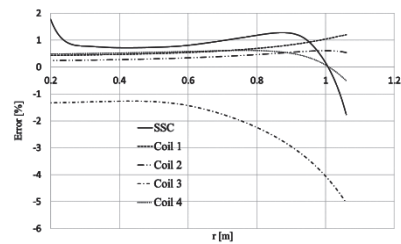


Fig. 4 Result of error rate of the magnetic field

Table 1 Error rate of the magnetic field

Field error [%]	Coil 1	Coil 2	Coil 3	Coil 4	SSC
Maximum	1.20	0.61	-5.05	0.62	-1.76
r=1.06 m	1.20	0.54	-5.05	-0.51	-1.76

Table 2 Maximum displacement of deformed coil

displacement [mm]	Coil 1	Coil 2	Coil 3	Coil 4	SSC
Thermal	5.87	5.87	7.57	6.44	6.20
Lorentz	1.91	1.76	2.75	2.46	0.72

### 参考文献

- S. Nagaya, A. Ishiyama, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 23, (2013), 4601204
- X. Wang, A. Ishiyama, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 24, (2014), 4601605
- X. Wang, A. Ishiyama, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 25, (2015), 4601904