

鉄系形状記憶合金を用いた Y-Ba-Cu-O バルク超電導体の締結効果

Y-Ba-Cu-O bulk superconductors reinforced with ferrous shape memory alloys

関 宏範, 河崎 慎司, 丸山 忠克 (淡路マテリア); 井上 和朗, 腰塚 直己, 中山 千秋, 村上 雅人 (芝浦工大)
SEKI Hironori, KAWASAKI Shinji, MARUYAMA Tadakatsu (AWAJI MATERIA); INOUE Kazuo, KOSHIZUKA Naoki,
NAKAYAMA Chiaki, MURAKAMI Masato (SHIBAURA INSTITUTE OF TECHNOLOGY)

E-mail: hiro.seki@awaji-materia.co.jp

1. はじめに

バルク超電導体が有するマイスナー効果やピン止め効果を利用して、モーターや非接触機構などへの応用開発が進められている。

しかしながら、バルク超電導体はセラミックスであるため破壊靱性値が低く [1], 熱衝撃や高磁場を捕捉した際のローレンツ力によって破壊することもある。

常磁性である鉄系形状記憶合金 (Fe-Mn-Si) は、形状回復効果を示す。このリングによって、バルク超電導体の周囲から形状回復ひずみで締め付けることが、バルク超電導体の補強に有効であることを既に報告した [2]。

一方、バルク超電導体は、液体窒素や冷凍機で冷却して使われるため、その冷却時に発生する熱応力に耐えることが求められる。また、バルク体はその厚みを増加させるほど捕捉磁場特性が向上するが、厚みのあるバルク超電導体を作製することは難しい。

そこで、本研究では、鉄系形状記憶合金を利用したバルク超電導体の補強方法が、液体窒素による急冷でも破壊防止効果があるか、また、薄いバルク体を重ねて鉄系形状記憶合金リングで一体化した場合に単体のバルク体よりも捕捉磁場が向上するかどうかについても検証した。

2. 実験方法

供試材として、Y-Ba-Cu-O 系バルク超電導体を用いた。組成は $Y_{1.8}Ba_{2.4}Cu_{3.4}O_x$ であり、捕捉磁場を向上させるため、 CeO_2 を 1wt% 添加し、ホットシーディングによる種結晶溶解成長法により作製した。熱衝撃試験用のバルク超電導体の寸法は $\phi 37 \times 14t$ であり、薄いバルク体の重ね合わせには $\phi 37 \times 10.5t$ のバルク体 4 枚を用いた。

鉄系形状記憶合金の組成は、Fe- 28wt%Mn- 6wt%Si- 5wt%Cr であり、リング寸法は厚みを 2 mm、高さをバルク体と同寸法とした。このリングは $350^\circ C$ の加熱で内径が 2.8% 収縮する能力を有する。

3. 実験結果および考察

Fig. 1 に、試験片を加熱処理後、液体窒素に投入したときの外観を示す。締結補強をしていないバルク超電導体は、 $200^\circ C$ の加熱後、液体窒素で急冷するとクラックが発生するが、鉄系形状記憶合金リングで締結補強したバルク超電導体は $400^\circ C$ に加熱後、液体窒素で急冷してもクラックは発生しない。これは、鉄系形状記憶合金で補強したバルク超電導体には、リングから圧縮応力が作用しており、これが急冷時にバルク体表面に発生する引張応力を緩和したためと考えられる。

Fig. 2 に、薄い 4 つのバルク体を 1 つの鉄系形状記憶合金リングで補強した試料と、厚み 14 mm の 1 つのバルク体試料に対して 5 T の外部磁場中で $-231^\circ C$ まで冷却したときの捕捉磁場を示す。単体のバルク体試料と比較して 4 つバルク体を重ねた試料はその捕捉磁場は 1.36 倍となった。これは、鉄系形状記憶合金リングを用いることで、バルク体の重ね合わせとして有効に作用していることを示す。一般にバルク超電導体の厚みを増加させることは、種結晶以外からの核生成とそこから結晶成長を抑える必要があり、これには過冷却に関する温度制御や高い製造プロセスの管理技術が必要である。鉄系形状記憶合金リング

で薄いバルク体を一体化することにより、容易に厚みのあるバルク体を得ることができ、高い捕捉磁場をより遠くに飛ばす必要のあるドラッグデリバリーや水質浄化用途などに広く有効と考えられる。

4. まとめ

鉄系形状記憶合金リングで補強することにより、バルク超電導体の耐熱衝撃性が向上するところが明らかとなった。また、鉄系形状記憶合金リングを用いて、薄いバルク体を一体化することが可能であり、その厚み効果により単体のバルク体より大きな捕捉磁場特が得られることもわかった。以上のように、鉄系形状記憶合金リングを用いてバルク超電導体の補強と複数バルク体の一体化による有効厚みの向上が可能である。

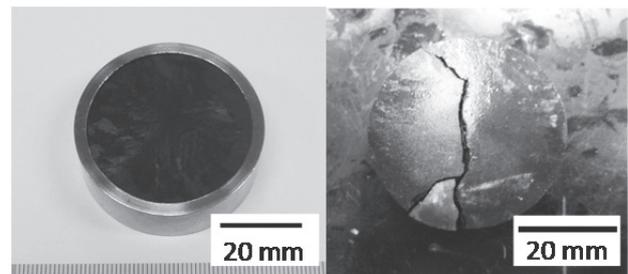


Fig.1 When bulk Y-Ba-Cu-O superconductors with and without Fe-Mn-Si ring were cooled rapidly from $400^\circ C$ to $-196^\circ C$, the sample without the ring was destroyed. In contrast, such cracks were not introduced in the sample reinforced with the ring.

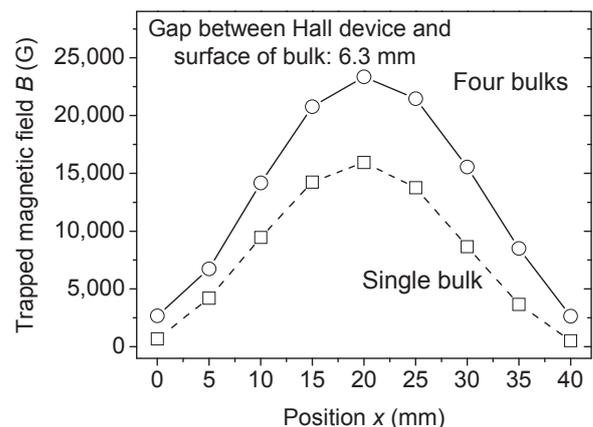


Fig.2 Trapped magnetic field distribution for single Y-Ba-Cu-O bulk and that for four stacked bulk plates assembled in a shape memory alloy ring.

参考文献

1. T. Okudera, et al.: Physica C, Vol. 392-396 (2003) p.628
2. Y. Shimpo, et al.: Physica C, Vol. 470 (2010) p.1170

磁場形状を変化させた複数回パルス着磁における磁束侵入研究

The magnetic flux penetration studies in multiple pulse magnetization with varying magnetic field shape

太田 博之, 木伏 貴映, 下田 竜也, 菊田 淳, 小川 純, 福井 聡, 岡 徹雄(新潟大学); 横山 和哉(足利工業大学)
 OTA Hiroyuki, KIBUSHI Takaaki, SHIMODA Tatsuya, KIKUTA Jun, OGAWA Jun, FUKUI Satoshi,
 OKA Tetsuo (Niigata University); YOKOYAMA Kazuya (Ashikaga Institute of Technology)
 E-mail: fl3c043d@mail.cc.niigata-u.ac.jp

1. はじめに

超伝導バルクはその微細組織にピン止め点が導入されており、優れた磁場捕捉性能を有する。バルクに磁場を捕捉させる方法にパルス着磁法があり、コイルにコンデンサからの放電によりパルス磁場をバルクに捕捉させる着磁法で、装置が簡便であるという利点があるが、急速な磁束運動に伴った発熱から捕捉性能が低下する。その対策として、初期温度と印加磁場を変化させ、発熱を抑える2段階着磁法(MMPSC)が最も有効とされているが[1]、本研究では、その着磁段階で形成されるM字型分布と呼ばれる、バルク中心よりも周辺部がより多くの磁場を捕捉している磁場分布について磁束侵入挙動の調査を行うことで、さらなる磁場捕捉性能の向上を目指す。

2. 実験方法

試料は空孔を減らして緻密に合成することで機械的強度を改良した Dy 123 系と、磁場捕捉性能の高い Gd123 系超伝導バルク(共に $\phi 30\text{mm} \times t10\text{mm}$: 新日本製鐵製)を用いる。GM 冷凍機(AISIN 製 GD101S)を用いた磁極中に Fig. 1 のように設置し 30K まで冷却した。結晶成長領域(GSR)上で中心からの距離が $r=0, 3, 6, 9\text{mm}$ となる点でホールセンサ(F.W.Bell 製, BHT921T)を用いて、パルス印加中の磁束侵入挙動及び捕捉磁場を測定した。印加する複数回磁場は 5-7 T, 5-5-7 T であり、7 T の印加前にはどちらもM字型形状の磁場分布を形成している。

3. 実験結果および考察

Fig. 2 に最終磁場(7T)印加前の磁場形状を示す。縦軸が磁束密度 $B_t(\text{T})$ 、横軸がバルク中心からの距離 $r \text{ mm}$ となっている。まず、Dy 系では中心が同等、周辺部が異なる捕捉磁場をもつ M 字型の分布を示している。この分布に 7 T を印加すると、周辺部に多く磁場がある 5-5-7 T の方が $r=0 \text{ mm}$ における磁束侵入量が多い。

Gd 系では、Fig. 3 よりM字型分布に対して 7 T を印加すると、単一パルスに比べて磁束侵入量が増加した。また、中心磁場が 5-7 T よりも 0.2 T 程多く着磁された 5-5-7 T では、磁束の侵入が抑えられ、 $r=0 \text{ mm}$ において本バルクで最高捕捉磁場となる 3.43 T を達成した。

これらの結果から、同じ M 字型の分布であっても、周辺部の捕捉分布を高めた形状ではより侵入量が増加し、対して中心部を高めると侵入量が減少することが分かった。しかし凸字や台形型に対しては、凸字型と、その凸字型と同等の中心磁場で周辺部の捕捉分布のみを高めた台形型に対して、本実験と同様の磁場を印加したが、後者の侵入量が減少し、M字型の結果とは異なった。この現象は、M字型とはバルク内の磁場や電流の分布が異なるためであると思われる、その分布の違いが2段階着磁法(MMPSC)での高磁場捕捉に繋がっていると考えられる。

4. まとめ

本研究では、2段階着磁法(MMPSC)などで高磁場を捕捉させるために重要とされるM字形状を変化させることで、どのように磁束侵入や捕捉磁場に影響しているのかを示した。し

かし本研究では、同一温度下(30K)での複数回着磁であった。今後は温度パラメータを変えながら、最適な磁場形状を模索し、さらなる磁場捕捉性能の向上を目指していく。

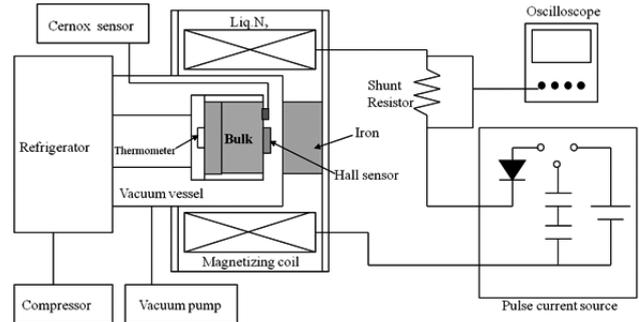


Fig.1 Illustration of experimental setup

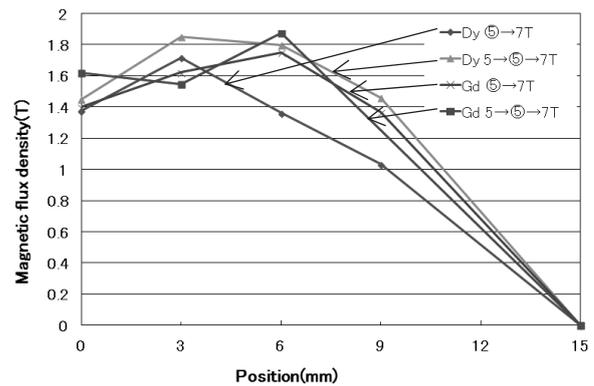


Fig.2 Trapped magnetic field of the magnetic field applied before the final

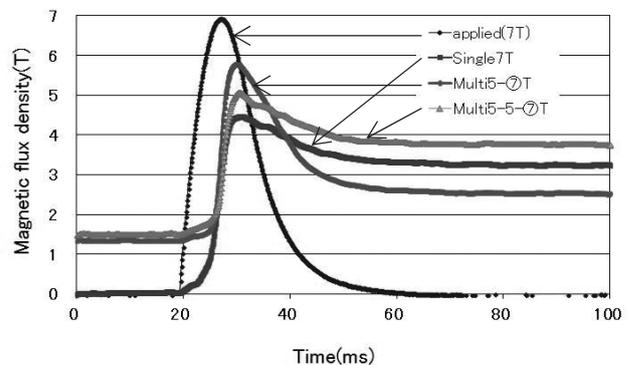


Fig.3 Magnetic flux penetration behavior of 7 T (Gd)

参考文献

1. H.Fujishiro, et al.: Mat.Sci.Eng.B151(2008)95-100

2個の種結晶から結晶成長させた YBCO バルク磁石の選択的な磁束侵入 Preferential Magnetic flux Invasion to YBCO Bulk Magnet Grown from Two Seed Crystals

岡 徹雄, 堀内 琢磨, 菊田 淳, 小川 純, 福井 聡, 佐藤 孝雄 (新潟大学);
横山 和哉 (足利工大); マルコ・ランガー (IFW ドレスデン)

OKA Tetsuo, HORIUCHI Takuma, KIKUTA Jun, OGAWA Jun, FUKUI Satoshi, SATO Takao (Niigata Univ.);
YOKOYAMA Kazuya (ASHI TECH); LANGER Marco (IFW Dresden)

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

1. はじめに

高温超伝導バルク体は着磁することによってコンパクトな擬似永久磁石 (バルク磁石とよぶ) として利用できる。これを強磁場の発生源として広く応用するため、簡便でコンパクトなパルス磁場法 (PFM) による磁場捕捉性能の向上をねらった研究を実施した。すでにパルス着磁法によって 5T を超える磁場捕捉が報告されているが [1], PFM ではバルク磁石内部で量子化した磁束の運動によって発熱が起これ、その捕捉磁場性能を著しく下げることが知られることから、発熱を低減すればその捕捉磁場性能の更なる向上が望める。

30K 程度の低温で高い J_c の領域では、磁束侵入そのものが強く抑制され、バルク磁石の着磁は困難となる。そこで筆者らは磁場侵入の促進を目的に、2つの種結晶を用いて人為的に不均質性を強めた構造を作り、磁場捕捉性能の向上をねらい、着磁しやすいバルク磁石の合成とその磁気的振る舞いを実験的に評価した。

2. 実験方法

円柱状の Y-Ba-Cu-O (Y123 系) バルク磁石を合成する際に、結晶成長の起点となる種結晶を 2 個並列して表面に配置した前駆体を使って成長させたバルク磁石を得た (ϕ 17mm \times t8mm)。Fig.1 に試料となった 5 つバルク磁石の外観と種結晶の配置を模式的に示す。GM 冷凍機 (AISIN, GD101S) により 31K に冷却し、液体窒素で冷却したコイルとパルス電源 (日本電磁測器, SBV-10124, 120mF) から単発のパルス磁場によって着磁した。ホールセンサー (F.W.BELL, BHT-921) により試料表面中央の捕捉磁場を評価し、セルノックス抵抗温度計 (セルノックス) によって表面の温度分布を評価した。

3. 実験結果と考察

Fig. 2 に試料中央の捕捉磁場を印加磁場に対して示す。図中の #1 と #2 は従来法である 1 つの種結晶を試料中央に設置した試料であり、#3~5 は 2 個の種結晶を並列配置したものである。両者への磁場侵入は明確に異なり、後者へはより低磁場で磁場は侵入した。Fig. 3 にはパルス印加時の磁場侵入のプロファイルから 0.5T に達するまでの時間を示す。2つの種結晶によって合成した試料では磁場侵入がその初期の段階から低磁場で起こっている。低磁場での着磁は発熱の低下を暗示し、着磁しやすいバルク磁石を可能にすると考えられる。また、図 1 に示す 2 つの特徴的な結晶成長領域 narrow GSR と wide GSR での局所的な温度測定により、両者の温度上昇に違い見られ、磁場侵入が選択的に起こっていることが示唆された。これは磁場の侵入ゲートの意図的な構成を暗示し、これによる発熱の低下と高磁場捕捉に繋がる可能性を示した。

4. まとめ

均質に作成したバルク磁石よりも、異方的な結晶成長した方が低い磁場での着磁が可能であった。この結果は発熱による超伝導性能の低下が避けられないパルス着磁において、低磁場での着磁は発熱の低減を意味しており、より高磁場の捕捉性能を得ることに繋がる。

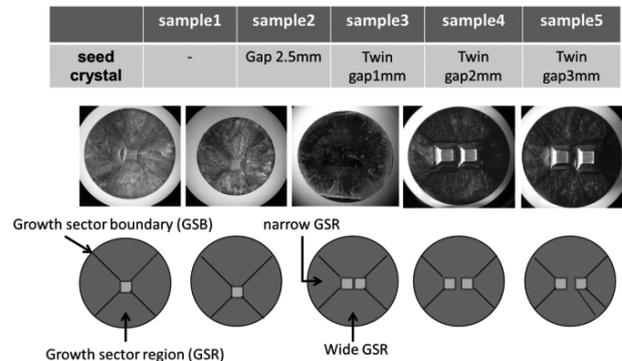


Fig. 1 Top surface view of the bulk samples with the arrangement of the seed crystals

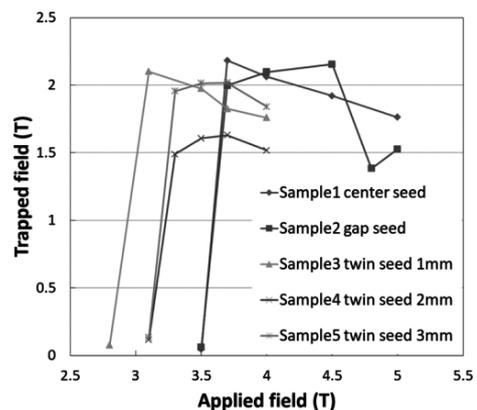


Fig. 2 Trapped flux density after various single pulsed field application

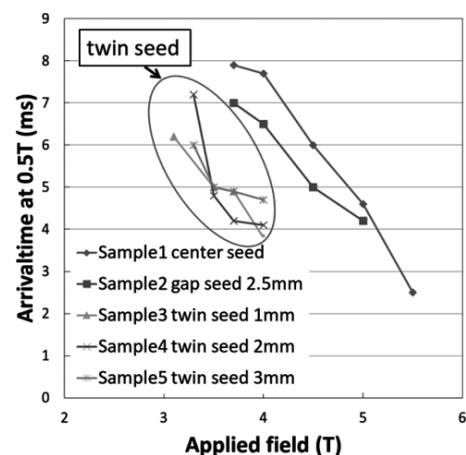


Fig. 3 Plots of arriving times at the magnetic flux density of 0.5 T for various samples

参考文献

1. H. Fujishiro, et al.: Physica C, Vol.445-448 (2006) p.334

超伝導バルクの物質特性がパルス着磁過程に及ぼす影響の解析的検討

Numerical study of the influence of material properties on pulse field magnetization process for HTS bulk magnet

渡辺 直土, 小川 純, 福井 聡, 岡 徹雄, 佐藤 孝雄(新潟大学)

WATANABE Naoto, OGAWA Jun, FUKUI Satoshi, OKA Tetsuo, SATO Takao (Niigata University)

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

1. はじめに

超伝導バルクのパルス着磁過程の最適化を行うために、パルス着磁過程における超伝導バルク内の電磁現象を模擬した解析モデルの作成を行った。そこで、本研究では報告されている物理特性を基に各種パラメータを決定し数値実験を行い、実際に測定した実験結果との比較を行った。[1]

2. 解析モデル

本研究で用いた超伝導バルクの物理特性を基にフィッティングを行い定式化したものを用い、パルス着磁過程におけるバルク内の電流分布と温度分布の導出を行った。パルス磁界の大きさは実験で印加した 5.5T をピークまでの時間 5.34mS で印加したものとした。図1に示すように印加用マグネットは実験で使用した高さ 50.0mm, クリアボア 73.0mm のコイルを用い、その中心位置に超伝導バルクが配置されており、初期温度として冷凍機により 31.2K に冷却されているものとした。これにシングルパルスを印加し、バルク表面から 0.5mm における捕捉磁界を導出した。

この結果、実験結果と大きく乖離していることから、バルクの臨界電流密度分布を図2に示すようにバルクの表面中心が最も臨界電流密度が高く、そこからは遠くなるにしたがって低くなっていくモデルを考えた。この理由として、バルクは種結晶が成長して形成するため、その成長の核となる部分が最も臨界電流密度が高いと考えられるからである。実測値と合わ

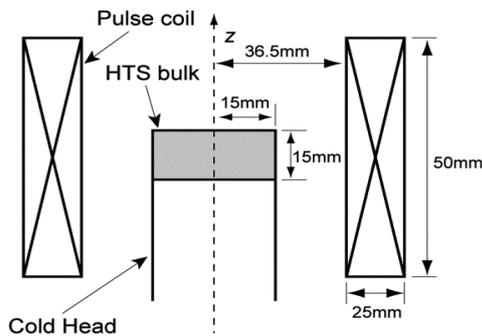


Fig.1 Schematic illustration of the experimental set-up for PFM method for HTS bulk.

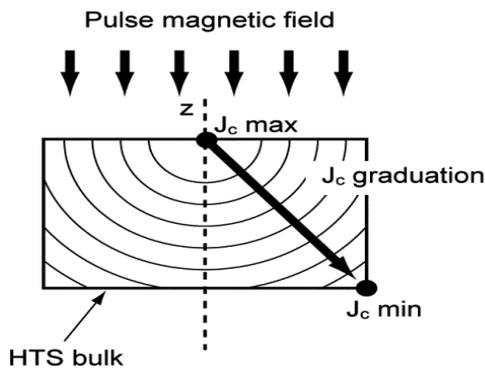


Fig.2 The critical current density distribution model of the HTS bulk.

せるために基準となる臨界電流密度との比 α とバルク内の臨界電流値の最大値と最小値の比 $J_{c \min} / J_{c \max}$ を変化させ数値実験を行った。

3. 解析結果

図3にパルス磁界 5.5T における臨界電流密度を変化させた条件での捕捉磁界特性を示す。バルク外側表面の捕捉磁界は $J_{c \min}$ に依存しないが、中心付近では $J_{c \min}$ の減少により捕捉磁界が増加していることが分かる。これより $J_{c \min}$ が捕捉磁界分布の調整パラメータの一つとみなすことができる。この手法により 5.5T の条件において $\alpha = 0.30$, $J_{c \min} / J_{c \max} = 83\%$ としたときに最も実験値に近い値を得られることがわかった。

図4に上記のパラメータを用いパルス磁界の最大値 5.5T と 6.6T における実験値と解析値の比較結果を示す。6.6T の実験結果と解析結果はよく一致することがわかる。この結果よりこの解析モデルは十分に実験値を模擬することが可能であることが示された。この電流分布モデルを用いることにより、超伝導バルク内の電磁条件を把握することが可能となり、パルスの大きさ、パルス幅、温度をコントロールすることにより着磁過程の最適化の提案が可能となった。

参考文献

1. <http://ikebehp.mat.iwate-u.ac.jp/>

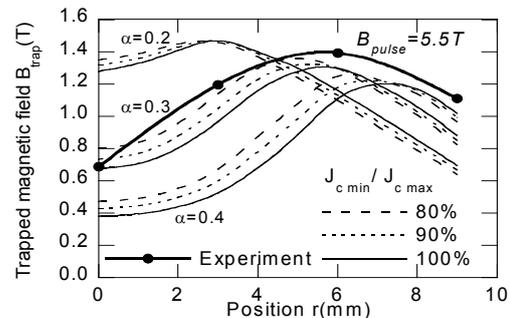


Fig.3 The influence of the critical current distribution on the trapped magnetic field B_{trap} , with applied pulse magnetic field 5.5 T.

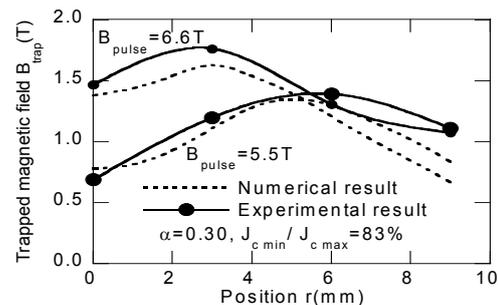


Fig.4 Comparison between the experimental and numerical result of trapped magnetic field on the HTS bulk surface with 5.5 T and 6.6 T pulse magnetic field.

捕捉磁場特性の改善を目的とした細孔バルク体の着磁特性の評価

Evaluation of a bulk superconductor with a small hole for improvement of trapped field performance by pulsed field magnetization

横山 和哉, 五十嵐 僚太, 戸ヶ崎 亮介(足利工大); 岡 徹雄(新潟大)

YOKOYAMA Kazuya, R. Igarashi, R. Togasaki (A.I.T.); OKA Tetsuo (Niigata Univ.)

E-mail: k-yokoyama@ashitech.ac.jp

1. はじめに

超伝導バルク体の大型化・高特性化により、パルス着磁で高磁場を捕捉させることが難しくなっている。これまでに磁束の侵入を容易にするため、バルク体に細孔加工を施す方法を考案し、パルス着磁後の捕捉磁場分布を評価してきた。これまでは磁場侵入を容易にすることを考慮して試料中心近くまで4個の細孔を加工したが、捕捉磁場が低下してしまう結果となってしまった。本文は磁場侵入を容易にすることと捕捉磁場を低下させないことを目標に、試料の外周近くに1個のみ細孔を加工してパルス着磁実験を行った結果を報告する。

2. 実験

GdBa₂Cu₃O_{7-x} バルク体 (φ60×20 mm, 新日鐵住金(株)) のGSR (Growth Sector Region) の外周近傍1か所に、φ1 mmの細孔を厚みの半分(10 mm)のみ加工した。図1に試料の写真を示す。このバルク体表面にホールセンサ (BHT-921, F.W.BELL) を同図(b)に示す4か所に貼り付け、データロガー (PA-S1000/8, (株)P&A テクノロジーズ) によりホール電圧を測定する。パルス着磁実験は、試料を2段式のGMサイクル冷凍機 (RF273SA, アイシン精機製) で冷却して、温度コントローラで20, 30, 40, 50 Kに調整し、各温度において3.1, 3.9, 4.6, 5.4, 6.2, 7.0 Tのパルス磁場(立ち上がり時間: 10 ms)を各1回印加した。磁場印加後、磁極表面(試料からの距離: 4 mm)の磁束密度分布を測定した。なお、細孔加工前に上記の条件で実験を行っており、加工前後の結果を比較した。

3. 結果および考察

図2に20~50 Kにおいて印加磁場3.1~7.0 Tの時の総磁束量を、細孔加工前と加工後の試料で比較した結果を示す。塗りつぶしの記号は加工前、白抜き記号は加工後の結果をそれぞれ表している。なお、上記の値は磁場分布から算出したものである。印加磁場3.9 Tではいずれの温度でも細孔を加工した試料の方が値が大きくなっており、細孔により磁束が侵入し易くなったと考えられる。一方、4.6 T以上では細孔加工した試料の値が若干小さくなっているが、大きな差異はない。ただし、20 Kにおいて印加磁場6.2 Tの時に値が大きく減少している。

図3に細孔加工前と加工後の試料の20 Kにおける印加磁場3.9, 5.4, 6.2 Tの時の試料表面における磁束密度の時間変化を示す。印加磁場3.9 Tでは加工後の試料のH1が大きくなくなり、細孔部分から磁束が侵入していることがわかる。5.4 Tでは両試料ともH3の部分でフラックスジャンプが発生している。また、6.2 TではH2の部分でもフラックスジャンプが発生しており、これが前述の総磁束量が大きく減少した原因であると考えられる。

4. まとめ

大型・高特性バルク体においてパルス着磁で捕捉磁場を向上させることを目的として、細孔を1つだけ加工したバルク体を用いて、着磁中のバルク体表面の磁束密度の時間変化を測定した。その結果、低印加磁場では磁束が侵入し易くなったものの、高印加磁場では大きな違いがみられなかった。今後、細孔を貫通させて、さらにハンダを充填した試料について検討を行う予定である。

本研究はJSPS 科研費 24560343の助成を受けたものである。

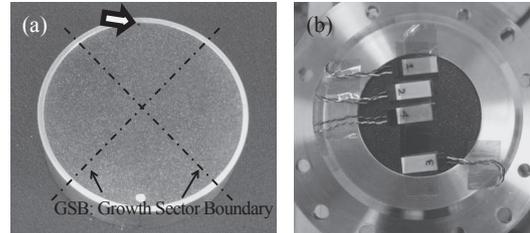


Fig. 1. (a) Photograph of a bulk superconductor with a small hole and (b) arrangement of Hall sensors.

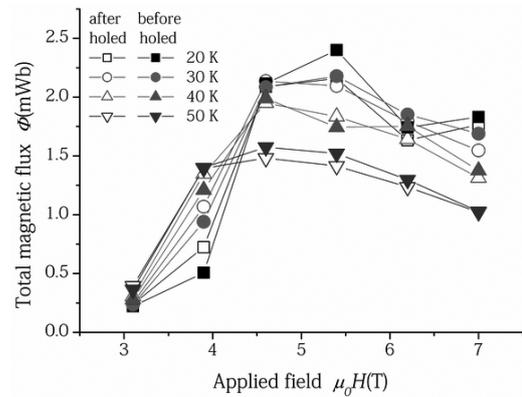


Fig. 2. Comparison of total magnetic flux between the sample before and after processing a small hole

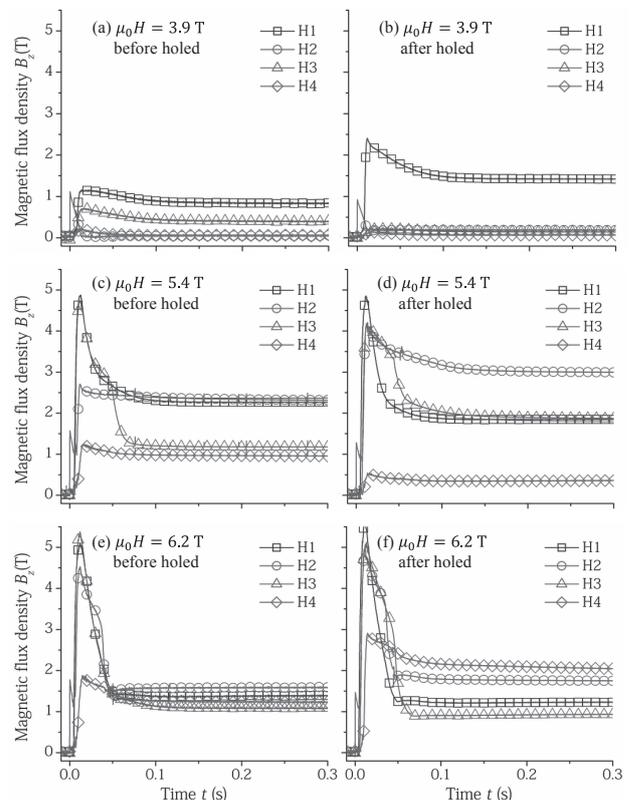


Fig. 3. Time responses of magnetic flux density on the bulk surface for $\mu_0 H=3.9, 5.4$ and 6.2 T.

Gd-Ba-Cu-O と MgB₂ で作製したハイブリッドバルクにおけるパルス着磁特性

Pulsed field magnetization of Gd-Ba-Cu-O/MgB₂ hybrid bulk

望月 豪彦, 氏家 徹, 内藤 智之, 藤代 博之(岩手大); 手嶋 英一(新日鐵住金)
 MOCHIZUKI Hidehiko, UJIE Toru, NAITO Tomoyuki, FUJISHIRO Hiroyuki (Iwate Univ.);
 TESHIMA Hidekazu (Nippon Steel & Sumitomo Metal Corp.)
 E-mail: t2214035@iwate-u.ac.jp

1. はじめに

RE-Ba-Cu-O 系超電導体バルクは高い捕捉磁場を発生することができ、多くの研究者によって溶融法で作製されたバルクの開発が行われている。しかし結晶配向させて作製するため、作製困難であり大型バルクの報告例は少ない。その一方で、MgB₂ は金属間化合物の中で最も高い転移温度($T_c=39$ K)を持ち、レアアース系超電導体に比べ電磁的異方性が低く、コヒーレンス長が長いことから、弱結合の問題がなく、多結晶体でバルクの作製が可能である。しかし磁場中冷却着磁法において未だ 5 T 級の捕捉磁場であり、レアアース系超電導体に及ばない。本研究では、それぞれのデメリットを補完し合った Hybrid バルクを試作し、磁場中冷却着磁特性を報告している[1]。

本研究は、Gd-Ba-Cu-O バルクとリング型 MgB₂ バルクで作製した Hybrid バルク[1]のパルス着磁特性とそれぞれのバルクが及ぼす影響について研究した。

2. 実験方法

Hybrid バルクは MgB₂ バルク[2]にワイヤ放電加工で直径 22 mm の穴を開け、その中に改良型 QMG 法[3]で作製された Gd-Ba-Cu-O バルクをはめ込み作製した。PFM は各初期温度 T_s でソレノイド型パルスコイルを用いて立ち上がり 13 ms のパルス磁場を印加した。捕捉磁場はバルク表面中心に設置したホールセンサーを用いて測定し、磁場分布測定の際にはこのホールセンサーを 1 mm 上方で走査し測定した。Gd-Ba-Cu-O と MgB₂ はパルス着磁特性が異なるため 2 段階での着磁を行った。本実験での条件を Table 1 に示す。Pattern 2 の 2nd stage では MgB₂ の発熱を抑えるために Multi pulse を適用した。

3. 実験結果

Fig. 1 に Pattern 1 の条件で着磁した磁場分布の断面図を示す。1st stage では Gd-Ba-Cu-O バルクの最大捕捉磁場は 1.87 T であった。2nd stage では Gd-Ba-Cu-O バルク中心において $B_{Tmax}=1.80$ T であり磁場の減少が確認された。2nd stage における MgB₂ の発熱による磁場損失がリング型 MgB₂ バルクによる捕捉磁場の向上よりも大きいためであると考えられる。また、リング型 MgB₂ バルクにおいて、リング型 MgB₂ バルクにのみ着磁させたときよりも低い磁場となった。これは Gd-Ba-Cu-O バルクの漏れ磁場(逆向き)の影響が起因していると考えられる。

Fig. 2 に Pattern 2 の条件で着磁した磁場分布の断面図の拡大図を示す。パルス磁場 B_{ex2} 印加後、Gd-Ba-Cu-O バルクは $B_{Tmax}=1.94$ T であり、リング型 MgB₂ バルクの発熱が小さいため、リング型 MgB₂ バルクの寄与による捕捉磁場の増加が見られたと考えられる。パルス磁場 B_{ex3} 印加後、大きく歪んだ磁場分布が観測されたため、フラックスジャンプが生じたと考えられる。この影響によりリング型 MgB₂ バルクの B_T が低く、Gd-Ba-Cu-O バルク中心における B_T のかさ上げにつながらなかった。フラックスジャンプを抑制できれば Multi pulse により、発熱で生じる磁場損失が抑制でき B_T の向上につながると推測する。講演ではシミュレーションの結果を併せて最適な着磁について議論する予定である。

Table 1 Conditions of pulsed field magnetization.

Pattern No.	stage No.	T_s	B_{ex}
Pattern 1	1 st stage	20 K	$B_{ex1}=5.98$ T
	2 nd stage		$B_{ex2}=1.78$ T
Pattern 2	1 st stage		$B_{ex1}=5.99$ T
	2 nd stage		$B_{ex2}=1.41$ T $B_{ex3}=1.80$ T

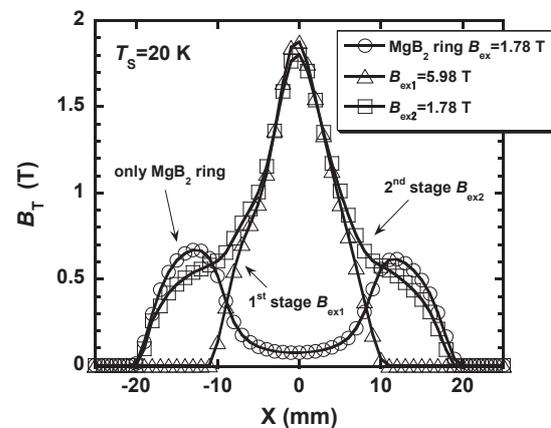


Fig. 1 Cross-section of the trapped field profiles for Pattern 1 and for only MgB₂ ring, which were plotted along the line of Y=0 mm.

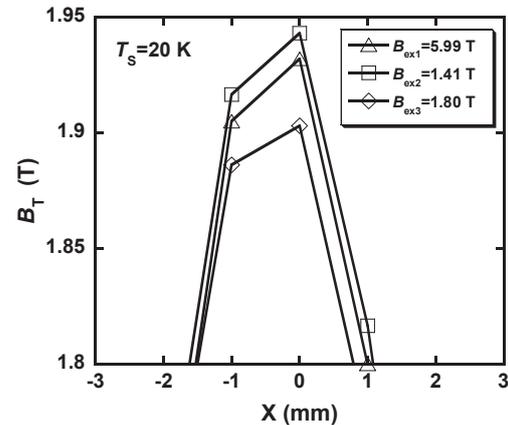


Fig. 2 Enlarged cross-section of the trapped field profiles for Pattern 2, which were plotted along the line of Y=0 mm.

謝辞

本研究の一部は、JST の A-STEP (No.AS232Z02579B) および日立金属・材料科学財団の援助を受けて実施した。

参考文献

- [1] 内藤 他: 低温工学・超電導学会概要集 **88** (2013) 1D-p11A
- [2] 氏家 他: 低温工学・超電導学会概要集 **88** (2013) 1D-p10A
- [3] M. Morita *et al.*: Physica C 253-240 (1994) 209-212

J-PARC 主リング電磁石電源増設のための SMES 装置の可能性検討

Feasibility study for a SMES system for an upgrade of the J-PARC main ring magnet power supply

野村 新一 (明治大); 嶋田 隆一 (東工大); 佐藤 皓, 新富 孝和 (高エネ研)
 NOMURA Shinichi (Meiji Univ.); SHIMADA Ryuichi (Tokyo Tech); SATO Hikaru, SHINTOMI Takakazu (KEK)

1. はじめに

J-PARC の陽子シンクロトロンは 2.5 秒周期の繰り返し運転で 30 GeV の陽子ビームを供給している。陽子シンクロトロンは 6 組の主リング電磁石で構成され、各々励磁用電源が接続されている。現在、30 GeV の陽子ビーム強度を高めるために、1 秒周期の繰り返し運転を可能にする主リング電磁石用電源の増設計画が検討されている。しかし、これに伴い、電力変動幅が 66.5 MW から 140 MW に増加し、これを補償するためにエネルギー貯蔵設備導入も重要な課題となっている。本稿では、SMES 方式による主リング電磁石電源の構成と Y 系線材を用いた電力変動補償用 20 MJ SMES の概略設計について報告する。

2. SMES 方式による主リング電磁石電源構成

図 1 は主リング (MR) 電磁石 1 組における SMES 方式による電源構成を示す。電力系統からの供給電力を最小にするために、SMES 用超電導コイルと主リング電磁石とを各々 DC/DC 変換器を介して連系する電源構成となっている。電力系統とはダイオード整流器を介して DC 側で並列接続される。したがって、主リング電磁石から再生される磁気エネルギーは系統へ戻さず SMES へ貯蔵される形となる。SMES 側に接続された DC チョッパーは直流連系用電圧源コンデンサ C の電圧を所定の電圧の範囲内に収めるように SMES の充放電を制御する。

シミュレーション結果により、主リング電磁石 1 組分の電力補償で要求される SMES の貯蔵容量 3.2 MJ (1.6 H, 2 kA) となり、6 組で 20 MJ 級の SMES となる。1 回の主リング電磁石の運転で、コイル電流は 2 kA から 1 kA まで変化する。すなわち、SMES の充放電率は 75% で最大貯蔵容量 3.2 MJ のうち 2.4 MJ が電力補償に利用される。シミュレーション結果の詳細については、超電導エネルギー貯蔵研究会ホームページ (www.rasmes.com, J-PARC 電力変動補償作業部会報告) を参照されたい。

3. 電力変動補償用 20 MJ SMES 概略設計

SMES 方式の開発案として YBCO 線材を用いた場合の可能性を検討した。また、超電導コイルの形状としてコイルに発生する電磁力を低減させるため、ヘリカルコイル形状の電磁力平衡コイル[1]の可能性を検討した。YBCO 線材の特性は、20 K, 10 T で 2500 A, 50 K, 10 T で 1000 A は得られるものと想定して検討を行った。

主リング電磁石 1 組分の電力補償を行う 3.2 MJ の電磁力平衡コイルは、図 2 に示すように外直径 1.0 m、高さ 0.2

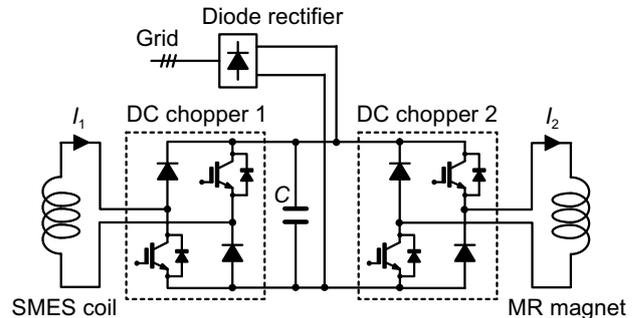


Fig. 1 Schematic diagram of the power supply system for a main ring (MR) magnet using SMES.

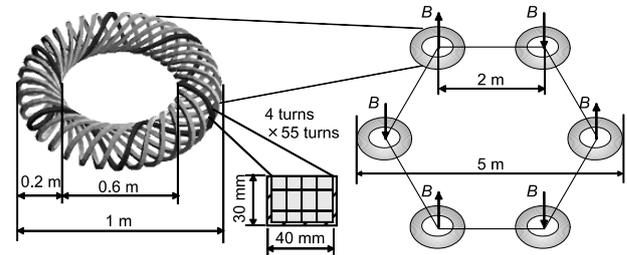


Fig. 2 Schematic illustration of the SMES coils for the J-PARC MR magnets. Although the illustration indicates the 6 sets of the helical winding case, based on the design value, the SMES coil is composed of 5 sets of the helical windings.

m 程度で最大磁場は 9 T 程度となる。コイル巻線は、ヘリカル巻数 6 ターン × 5 組 × 220 ターンとなり、1 組のヘリカル巻線の長さは約 1 km である。2 kA のコイル導体を 20 K ではテープ線材を 2 枚積層導体、50 K では 3 枚積層導体と考えれば、必要な線材量は 10 km ないし 15 km となる。ピリアル定理より 100 μm 厚の Hastelloy 基板に発生する応力は、2 枚積層導体で 160 MPa, 3 枚積層導体で 107 MPa と見積もられ、コイルに発生する電磁力は YBCO 線材自体の引張応力で支持できるものと期待できる。また、主リング電磁石 6 組分の SMES コイルをすべて一か所に設置した場合、10 m × 10 m の範囲で設置することは可能であると思われる。

4. おわりに

本研究は高エネルギー加速器研究機構からの依頼を受けて、超電導エネルギー貯蔵研究会の作業部会として行われました。貴重な議論をさせて戴いた関係者の皆様に感謝申し上げます。

[1] S. Nomura, H. Chikaraishi, H. Tsutsui, R. Shimada, IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 23, no. 3, 5700904 (2013).

22kV/12kA 級大電流超電導ケーブルの開発(1) —設計検討—

Development of 22 kV/12 kA-class large-current HTS Cables (1) -design study-

大屋 正義, 増田 孝人(住友電工); 中野 哲太郎, 丸山 修, 本庄 昇一(東京電力)

OHYA Masayoshi, MASUDA Takato (Sumitomo Electric Industries, Ltd);

NAKANO Tetsutaro, MARUYAMA Osamu, HONJO Shoichi (Tokyo Electric Power Company)

E-mail: ohya-masayoshi@sei.co.jp

1. はじめに

高温超電導ケーブルの導入モデルの 1 つとして、発電機引き出し線(発電機～変圧器間)への適用を検討している⁽¹⁾。22kV/12kA を仕様とし、相分離母線を比較対象とした経済性検討の結果、I)コンパクトでフレキシブルな超電導ケーブルを適用することで土木費を抑制でき、発電機と変圧器の配置自由度が増す、II)電流値が大きく、負荷率が高いことに起因して超電導ケーブル適用による損失削減効果が大きい等のメリットがあり、詳細な設計検討を実施中である。

2. 大電流ケーブルの構造

設計検討中の大電流ケーブルの構造を図 1 に示す。

- ・フォーマは可撓性を有する金属管の外周に、短絡電流のバイパス回路となる銅保護層を巻き付けて構成し、金属管内部にも液体窒素を流すことで往復冷却を行う。
- ・超電導シールド層は設けず、銅線材で遮蔽層を構成し、片端接地にすることで遮蔽電流が発生しない構造とした。
- ・三相のケーブルは 350mm 程度の離隔で配置することで、定常時の他相磁場の影響や、短絡電流が流れた際に発生する電磁力を抑制する。

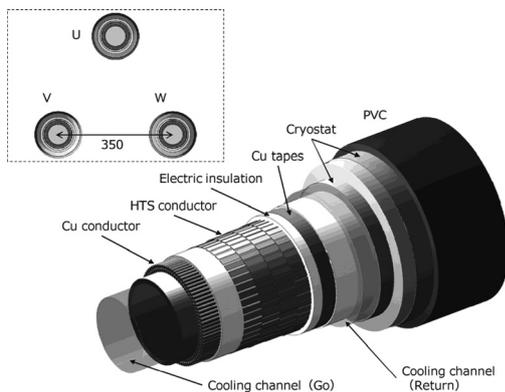


Fig.1 Structure of large-current HTS cables.

3. 設計検討

経済性検討の結果から、ケーブル損失は 10W/m/ph @ 50Hz を目標値として設計検討を行っている。低コスト化を指向して超電導シールドを設けないため、他相ケーブルの漏れ磁場の影響を検討する必要がある。主な検討事項として、(A) 超電導層の I_c 低下及び交流損失増加、(B) 銅シールドの渦電流損失発生、(C) 断熱管の渦電流損失発生が挙げられる。

(A) 超電導層の I_c 及び交流損失

相離隔 350mm における磁場分布解析の結果、超電導層に印加される垂直磁場は最大 10mT であり、約 13% の局所的な I_c 低下を考慮する必要がある。また、スパイラル巻きした線材に周期的に印加される垂直磁場による交流損失の平均値から約 0.5W/m/ph の損失発生が予想される。

(B) 銅シールドの渦電流損失

従来の超電導シールドは両端で三相短絡することで導体電流とは逆向きの電流が誘導されるが、本ケーブルの銅シールドに誘導電流を流すと大きな損失が発生するため、片端接地とする。

30mm 幅、0.1mm 厚の銅テープをギャップ巻きしたケースの損失を FEM 解析した結果、約 5W/m/ph 損失が発生した。テープ面内で発生する渦電流が損失要因である。このため、4mm 幅、0.2mm 厚の銅線材をスパイラル巻きしたケースの損失を解析した結果は約 0.1W/m/ph であり、損失抑制効果が大きい本構造を採用した。

(C) 断熱管の渦電流損失

断熱管で発生する渦損のうち、冷却負荷になる内管に発生する損失を FEM 解析した。SUS 内管の平均径は 108mm、厚さ 0.8mm である。ケーブルコアと内管の偏心をパラメータとして損失を解析した結果を図 2 に、解析結果の一例を図 3 に示す。二次元と三次元で大きな損失差は確認されず、三相通電時には約 5W/m/ph の損失が発生する。本損失を低減するため、相離隔の最適化検討および電磁シールドの適用検討等を行っている。なお、3mm 程度の偏心は損失値に大きな影響を及ぼさないと推定される。

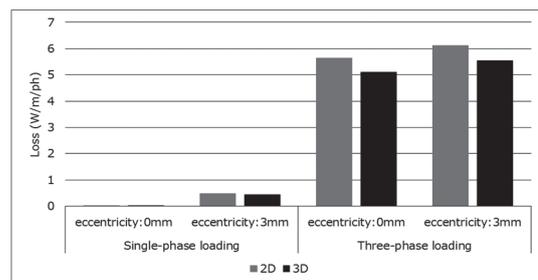


Fig.2 Calculated eddy current loss of inner SUS pipe.



Fig.3 Calculated eddy current (3D, eccentricity: 0mm).

4. まとめ

発電機引き出し線を対象とした大電流ケーブルの開発を行っている。経済性検討の結果から超電導シールドを設けない設計を指向しており、他相磁場によって発生する損失の解析検討を行った。今後、実測値との比較検証を行うとともに、低損失化手法を検討する。

謝辞

本研究の一部は、NEDO の委託により実施したものである。

参考文献

1. M. Ohya, et al.: 2014 National Convention Record I.E.E. Japan, Vol.7, p.195

超電導フライホイール蓄電装置用磁性流体真空シールの開発

Development of Magnetic Fluid Vacuum Seal for Superconducting FESS

荒井 有気, 山下 知久, 長嶋 賢(鉄道総研); 高田 寛, 大澤 芳夫, 西田 真司, 高野 祥央(イーグル工業)
 ARAI Yuuki, YAMASHITA Tomohisa, NAGASHIMA Ken (RTRI);
 TAKATA Hiroshi, OSAWA Yoshio, NISHIDA Shinji, TAKANO Yoshihisa (EKK)
 E-mail: arai.yuki.77@rtri.or.jp

1. はじめに

鉄道総研では、NEDO 助成事業により、プロジェクト各社とともに、2012 年度より系統安定化用の超電導フライホイール蓄電装置を開発している。構成概略を Fig.1[1]に示す。数 t オーダのフライホイール(弾み車)を $3000\text{--}6000\text{ min}^{-1}$ で回転させることで、100 kWh 超の蓄電容量と MW 級の出力を目標としている。フライホイールのスラスト荷重は RE 系超電導コイルと RE 系超電導バルク体を組合せた超電導磁気軸受で非接触支持する。フライホイールの風損低減および超電導部材への断熱のため、これらは真空空間に設置される。

これまでに、Bi 系超電導コイルと RE 系超電導バルク体により非接触支持・回転が可能なることを報告している[2]。一方、真空空間へのエネルギー授受のための従来の磁気カップリングを用いたトルク伝達装置[2]では、大型化・高回転化が困難であった。そこで、筆者らは磁性流体真空シールの開発を行い、直径 100 mm の軸の真空封止と、 6000 min^{-1} を超える高速回転状態でのトルク伝達が両立できることを実証した。

2. 磁性流体真空シールおよび試験装置

磁性流体真空シールは、磁性体でできたロータ(回転軸)と、磁石・磁性材等でできたステータと、その間に塗布される磁性流体からなる。付帯構造としては、ロータ・ステータの接触防止のための機械軸受、発熱を冷却するための水冷ジャケット・配管等がある。

試験装置の系統図を Fig.2 に示す。回転軸径 100 mm の供試体は真空チャンバに取り付けられ、真空引きはドライポンプで 10 Pa 以下まで行った。真空度はクリスタルイオンゲージで測定した。供試体の大気側には、トルク計を介して、AC スピンドルモータにより、回転駆動された。冷却配管には、チラーで 20°C に温調した冷却水を流した。

3. 試験結果

7000 min^{-1} までの回転試験結果を Fig.3 に示す。 7000 min^{-1} までトルク・圧力に異常は見られず、 7000 min^{-1} でも 0.7 Pa 程度を保った。これにより、直径 100 mm の軸の真空封止をしたまま、 6000 min^{-1} 以上の高速回転が可能なることを実証した。試験後に分解調査をしたところ、接触等の痕跡は見られなかった。また、磁性流体にも劣化は確認されなかった。

4. 考察および今後の予定

$3000\text{--}6000\text{ min}^{-1}$ の範囲で、1 MW のエネルギー授受を行うためには、鋼材であれば軸径は約 60 mm 以上あればよく、今回開発した磁性流体真空シールは、本フライホイール蓄電装置の真空容器内外の真空シールに適用可能といえる。回転駆動トルクから算出される損失は、 6000 min^{-1} で約 1.7 kW であり、蓄電装置出力に比べて十分小さく許容できるものである。今後は長期運転に向けた、耐久性検証を行う予定である。

5. 謝辞

本研究は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の助成を受けて実施したものである。

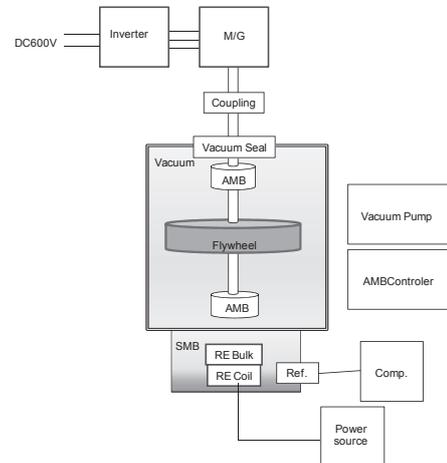


Fig.1 Schematic view of superconducting FESS

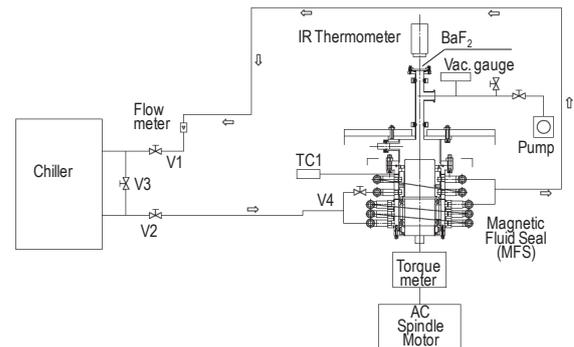


Fig.2 Schematic view of experimental apparatus

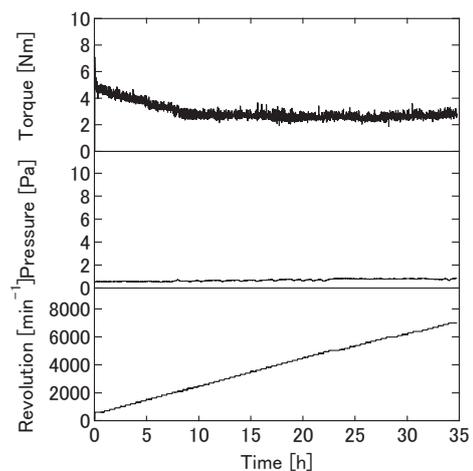


Fig.3 Experimental result of magnetic fluid vacuum seal

参考文献

1. H. Hasegawa, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 88 (2013) p.95
2. Y. Arai, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 87 (2013) p.89

ローレンツ力を利用した海水・油分離装置内の海水流れと 流路断面形状に関する研究

The relation between the seawater flow and cross-section shape of channel of Lorentz-force-type seawater-oil separator

赤澤 輝彦, 岩田 祐樹, 永友 勇氣, 岩本 雄二, 梅田 民樹(神戸大学)

AKAZAWA Teruhiko, IWATA Yuki, NGATOMO Yuki, IWAMOTO Yuji, UMEDA Tamiki (Kobe University)

E-mail: akazawa@maritime.kobe-u.ac.jp

1. はじめに

ローレンツ力を利用した海水・油分離装置の開発を本研究グループは行っている。Fig.1 に装置の概略図を示す。電極板を取り付けた海水ダクトを磁場中に設置し、海水に直交電磁場をかける。以下、直交電磁場のかかる空間を分離空間と呼ぶ。分離空間では海水に含まれるイオンがローレンツ力 F_L を受ける。このためイオン濃度に勾配が発生する。この濃度勾配に起因して海水には圧力勾配が発生する。一方、油粒子は不導体であるためローレンツ力が働かない。油は、イオン濃度の偏りによって発生した圧力勾配の逆方向に反作用を受ける。電極板より下流に分離板を設ければ、油が浄化され油濃度が下がった海水の流れ(A)と、濃縮された海水の流れ(B)に分けられる。

本研究では分離装置内の海水の流れに関する知見を得るため、断面積が同じで断面形状の異なる海水流路を持つ分離装置を作成し、断面形状が海水流れに及ぼす効果について実験的に計測し考察を行った。

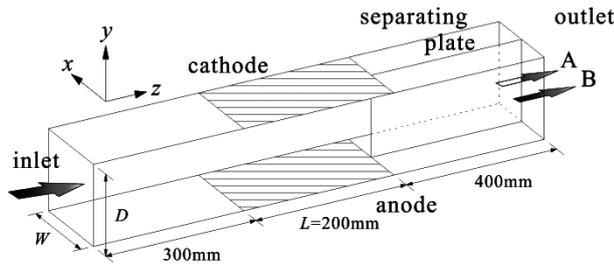


Fig.1 Schematic diagram of the oil-seawater separator.

2. 実験方法

本研究で用いた分離装置(Fig.1)は、海水流路(z)方向が鉛直上向きになるようにした。また、ダクトには、z方向に長さ $L = 200\text{mm}$ の電極板(PtコートTi板)を取り付け、海水に通電できるようにした。分離空間下流側のダクトには、流路を2等分するように仕切り板を設置した。また、分離空間の中心と磁場を印加する超伝導磁石の磁場中心を一致させた。本研究での磁場方向は、海水の流路方向を正とした。

海水タンクよりポンプで送られた海水は、一定の平均流速 u でダクトに流入するよう流量計を使って流量バルブを調整した。出口 A, B から排出される海水量 Q_A, Q_B は、排出される海水の重量を計測し評価した。海水の出口での偏りを流量比 $R = Q_A / (Q_A + Q_B)$ を用いて評価した。本研究では、電極間距離 $D = 30\text{mm}$ 、有効電極幅 $W = 30\text{mm}$ の正方形流路断面をもつ分離装置と $D = 23\text{mm}$ 、 $W = 39\text{mm}$ の長方形流路断面をもつ装置の2つを作製し、 $u = 5, 10\text{cm/s}$ の2つの流速で実験を行った。

3. 結果と考察

$u = 10\text{cm/s}$ のときの正方形ダクトおよび長方形ダクトにおける各磁場での R の電流密度 i 依存性を Fig.2 に示す。各磁場での R は流路断面形状に関係なく電流増大とともに単調に大きくなっている。このことは、イオンモデルを用いた数値シミュレーション結果[1]から以下のように定性的に説明できる。通電する電流量の増大とともに、 F_L は大きくなる。分離空

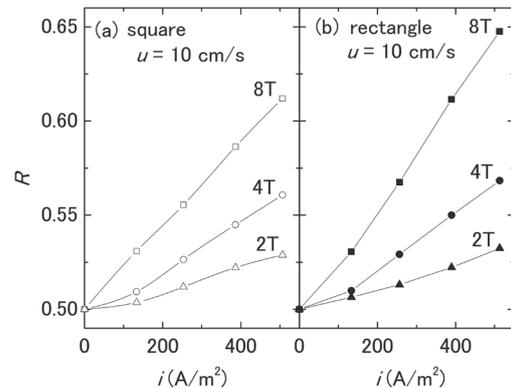


Fig.2 Current density i dependence of R for the square duct (a) and the rectangle one (b) at $u = 10\text{cm/s}$.

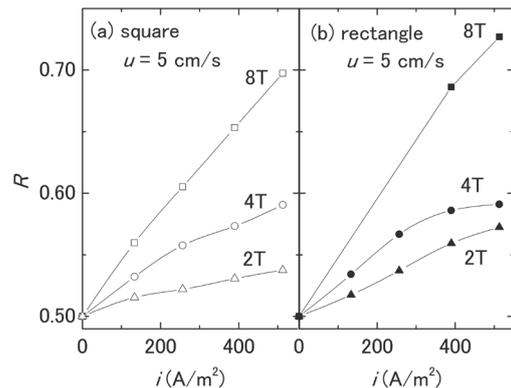


Fig.3 i dependence of R for the square duct (a) and rectangle one (b) at $u = 5\text{cm/s}$.

間には F_L に比例した一様な x 方向への圧力勾配が発生する。つまり、電流量の増大に伴い、分離空間出口の A 側の海水の圧力は B 側に比べ単調に大きくなる。一方、分離装置の海水出口は、A, B 側ともに大気圧である。したがって、分離空間から出口までの圧力差が大きい A 側のダクトを電流量増加とともにより多くの海水が流れる。

また、正方形流路をもつ分離装置の方が、長方形流路よりも海水の流出量の偏りが小さくなっている。このことも以下のように説明される。正方形流路の方が長方形流路よりも流路幅 W は短い。 F_L が同じであれば分離空間出口で x 方向に生じる圧力差は、正方形流路の方が長方形流路よりも小さくなり、海水の偏りは小さくなる。

$u = 5\text{cm/s}$ のときの正方形ダクトおよび長方形ダクトにおける各磁場での R の i 依存性を Fig.3 に示す。流速が小さくなったため、ダクト断面形状に関係なく $u = 10\text{cm/s}$ の場合に比べ相対的にローレンツ体積力による海水の偏りが強くなることがわかる。このことも数値シミュレーション結果と定性的に一致する。

1. Y. Iwata, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 87 (2013) p.192

磁場中での海水の電気分解におけるマイクロバブルの挙動の数値シミュレーション

Numerical simulation of the behavior of micro bubbles in brine electrolysis in magnetic fields

永友 勇気, 福田 航平, 赤澤 輝彦, 岩本 雄二, 梅田 民樹 (神戸大)

NAGATOMO Yuki, FUKUDA Kohei, AKAZAWA Teruhiko, IWAMOTO Yuji, UMEDA Tamiki

(KOBE UNIVERSITY)

E-mail: 136w518w@stu.kobe-u.ac.jp

1. はじめに

海水に磁場を印加し磁場と垂直な方向に通電を行うと、導体である海水にはローレンツ磁気力が働くが、不導体である海水の油には働かない。この違いを利用して海水から油を分離する MHD 油水分離装置が考案されている。この装置では通電の際に、極板での電気分解で塩素と水素の気泡が発生する。これらの気泡は装置内で重力による海水の対流を引き起こし、また気泡が極板に付着して通電を妨げることにより、分離機の効率に影響を与えることが考えられる。しかし、これまで行われてきた MHD 油水分離装置に関する理論的研究は気泡を無視して行われてきたため、海水の流れや、分離効率に対する気泡の影響はよくわかっていない。

そこで、本研究では磁場中での海水の電気分解における海水と気泡の運動を、電磁気学と流体力学を組み合わせた数値シミュレーションで解析した。計算には有限要素法ソフトウェア COMSOL MULTIPHYSICS 用いた。

2. シミュレーションモデル

海水を入れた直径 6cm のビーカーに二つの電極板を挿入し、 $\sim 1A$ の電流を流して電気分解を行い気泡の挙動を観察するとともに、対応する数値シミュレーションを行った。

数値シミュレーションでは、海水を一定の電気伝導率を持つ媒体として、電場と電流密度を計算した。一方、気泡を含む海水を気泡層流と考え、海水に働くローレンツ体積力と気泡に働く浮力などを考慮して海水と気泡の挙動の計算を行った。電極板では電流密度に比例して気泡が発生する。ただし、陽極では Cl_2 の海水への溶解を考慮し、気体発生量を陰極の $1/3$ とした。磁場は水面と垂直方向に印加されているとし、その大きさを変えシミュレーションを行った。

3. 結果

(i) 数値シミュレーションの結果、磁場がない場合、両電極板付近で発生した気泡の上昇による対流が見られ、また液体表面近くで陰極から陽極への流れが見られた。これらは、観察結果と定性的に一致する(Fig.1)。(ii) 0.05T の磁場を印加した場合、海水の流れが変わり、ローレンツ体積力が働く方向に、圧力、気泡の流れ、および気泡分布に偏りが見られた(Fig.2)。

これらの結果より、それ程大きくない磁場が、気泡と流体の挙動に大きく影響することが分かった。今後はより強い磁場で

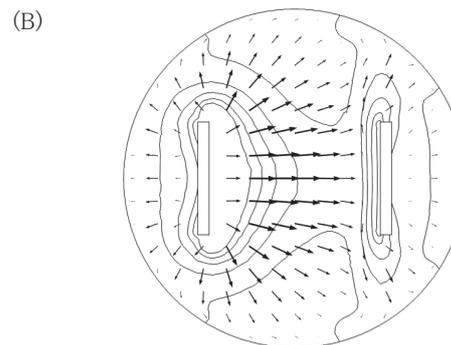
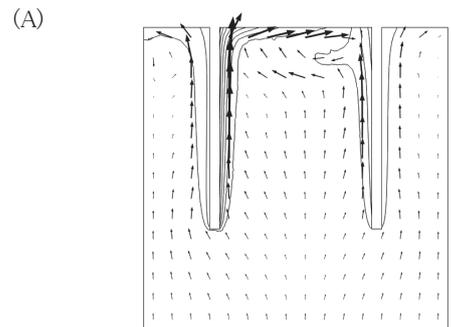


Fig.1: A result of numerical simulation without magnetic field. Velocity (arrows) and volume fraction (contour line) of gases are represented. (A) cross section. (B) top view.

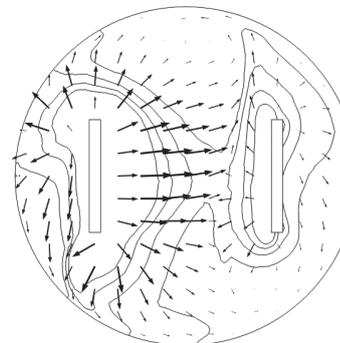


Fig.2 : A result of numerical simulation with magnetic field $B=0.05T$.

のシミュレーションおよび実験を行う予定である。また、油水分離装置の研究で用いられているダクト内での電気分解についても、気泡を考慮した数値シミュレーションを行う予定である。

始動時リラクタンストルク付与型高温超電導誘導同期回転機における 遮蔽体形状と回転特性の関係

Relationship between shield body shape and rotating characteristics in high temperature superconducting induction/synchronous machine having reluctance-type starting torque

西村 立男, 中村 武恒, 小笠 卓郎, 雨宮 尚之(京大)

NISHIMURA Tatsuo, NAKAMURA Taketsune, OGASA Takuro, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto Univ.);

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

1. はじめに

我々は、始動時のみリラクタンストルクが発現する高温超電導誘導同期回転機の検討を実施している[1,2]。

本研究では、リラクタンストルクの発現に寄与する高温超電導磁気遮蔽体の形状と回転特性について、実験および解析的検討を実施したので報告する。

2. 対象とした回転機の諸元

本研究では、日本電産パワーモータ(株)製の3相4極かご形誘導機を検討対象とした。固定子の外径は157 mm, 回転子の外径は99.4 mm, ギャップ長は0.3 mm, 積厚は88 mmである。また、固定子巻線は8/9分布短節銅巻線であり、回転子巻線にはDI-BSCCO[®]線材を適用した。さらに、回転子鉄心にはリラクタンストルクを発現させるためのスロットを4箇所穿孔し、GdBCO系の高温超電導バルク磁気遮蔽体を挿入した。

3. 解析方法

高温超電導磁気遮蔽体形状と回転特性の関係を検討するために、有限要素法による電磁界解析を実施した。解析ソフトには(株)JSOL製のJMAG[®]を使用し、二次元軸対象モデルを考えた。解析モデルをそれぞれFig.1, Fig.2, Fig.3に示す。Fig.1は磁気遮蔽体が挿入されていないHTS-ISMである。一方、Fig.2とFig.3には磁気遮蔽体が挿入されており、磁気遮蔽体の大きさはそれぞれ5 mm×10 mm, 5 mm×30 mmである。固定子巻線抵抗は0.12 Ωとし、ロータバーの導電率はDI-BSCCO[®]線材の E_c 特性を近似して 10^{12} S/mとした。また、磁気遮蔽体の比透磁率は 10^{-10} として十分小さな値を用いた。この時、入力電流を20 A, 入力周波数を60 Hz, すべりを 10^{-7} として、電流位相角を変化させたときのトルク値の評価をそれぞれの解析モデルに対して行った。

4. 解析結果と考察

Fig.4に、電流位相角を変化させたときのトルク値の解析結果を示す。磁気遮蔽体を挿入していないモデル1では、電流位相角に関係なく約3 Nmの誘導同期トルクが発生している。小さな磁気遮蔽体を挿入したモデル2では、誘導同期トルクに加えて若干のリラクタンストルクが発生している。一方、大きな磁気遮蔽体を挿入したモデル3では、3 Nmの誘導同期トルクに加えて7.6 Nmのリラクタンストルクが発生している。詳細な検討は講演当日に報告する。

謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金(挑戦的萌芽研究, No. 23656199, 2011~2012年度)の援助を受けて実施された。

参考文献

1. T. Nishimura, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 87 (2013) p.88
2. T. Nishimura, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 24, No. 3 (2014) 5200504 (4 pp).

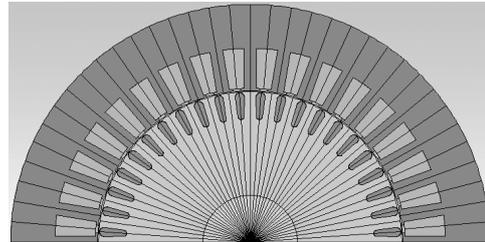


Fig. 1 Analysis model 1

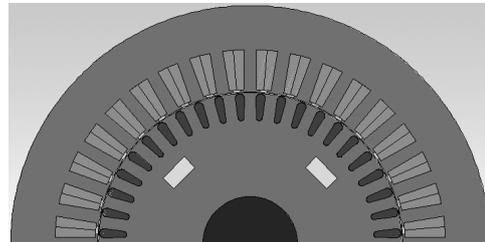


Fig. 2 Analysis model 2

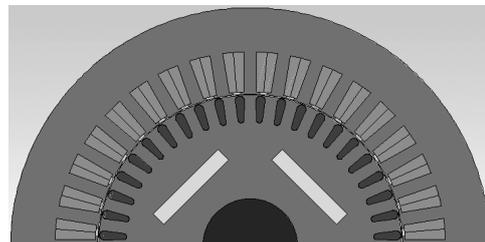


Fig. 3 Analysis model 3

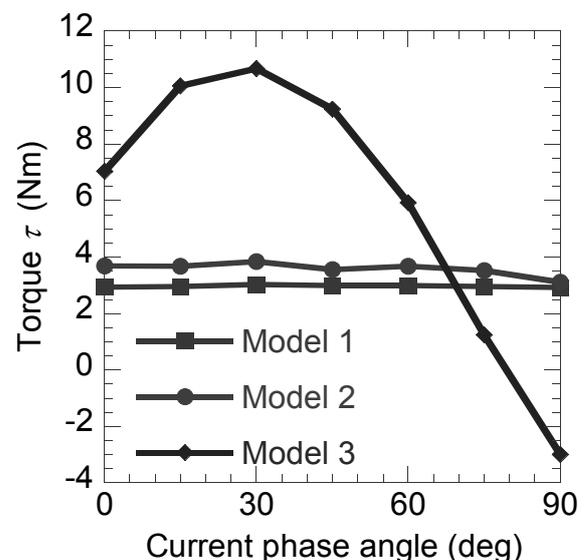


Fig. 4 Analysis result of torque vs. current phase angle characteristics

マルチポールソレノイド型高温超電導 SMES コイルの 線材使用量低減に関する検討

A study on wire usage reduction of multi-pole solenoid type HTS SMES coil

高野 玲央, 宮城 大輔, 津田 理(東北大)

TAKANO Reo, MIYAGI Daisuke, TSUDA Makoto (Tohoku University)

E-mail: r.takano@ecei.tohoku.ac.jp

1. はじめに

SMES は負荷変動補償や瞬低対策などに有効であるが、ヘリウム枯渇問題を考えると、今後は超電導コイルの HTS 化が必要となる。しかし、使用される HTS 線材は高価であり、線材使用量低減が重要な課題となる。HTS 線材の臨界電流は線材に印加される垂直磁場に大きく依存することから、垂直磁場を低減させ、臨界電流を大きくすることにより線材使用量を低減できると考えられる。そこで、本研究では、垂直磁場を低減するために、磁性体を用いて磁場分布を変化させる方法に着目し、マルチポールソレノイド型 SMES コイルにおいて、線材使用量低減に有効な磁性体形状やコイル形状、線材使用量低減効果のエネルギー貯蔵容量依存性について検討した。

2. 磁性体を用いた垂直磁場低減方法

HTS 線材の臨界電流は印加される垂直磁場に大きく依存する。この垂直磁場の低減方法として、SMES 用コイル上端部の最大垂直磁場の発生点近傍に磁性体を設置する方法が提案されている[1]。これは、Fig.1 に示すように、垂直磁場発生点近傍に磁性体を設置することで、磁性体内部に磁場を誘導し、コイル内部の垂直磁場を低減する方法である。この効果により、臨界電流は大きくなり、線材使用量の低減が可能となる。

3. マルチポールソレノイド型コイルの垂直磁場低減効果

本研究では、4 極のマルチポールソレノイド型コイルを考察対象とした。これは、SMES コイルとしてよく採用されているものの、磁性体を用いた垂直磁場低減の検討が十分に行われていないためである。SMES コイルに使用する線材は Bi2223 とし、コイルの内径を 0.25m、アスペクト比を 5 とした。また、運転温度を 30K とし、負荷率を 60% とした。そして、エネルギー貯蔵容量を 2MJ から 20MJ まで変化させた場合の、磁性体の垂直磁場低減効果について検討した。その結果を Fig.2 に示す。磁性体は、安価な強磁性体である鉄(新日鉄住金社製 50H800) とし、コイル全体を覆う高さ 0.50m の円柱型のものをコイル上下に配置するとした。

Fig.2 より、エネルギー貯蔵容量が大きくなるほど、磁性体を用いた垂直磁場低減による線材使用量低減効果が大きくなることからわかる。線材使用量の低減率は、2MJ コイルでは約 16% であるのに対し、20MJ コイルでは約 30% と、約 2 倍になった。これは、エネルギー貯蔵容量が大きくなるほどコイルが肉厚となり、垂直磁場の影響を受やすくなるためであると考えられる。Fig.3 に 2MJ コイルと 20MJ コイルのコイル上端部(Fig.1 の四角形で囲った部分)における磁束密度分布を示す。鉄が無い場合は、20MJ コイルの方が、垂直磁場がより広い範囲にわたって印加されている。このため、肉厚なコイルの方が、鉄を置くことによる磁束密度分布の変化が大きく、垂直磁場低減効果が大きくなると考えられる。実際に、2MJ コイルでは、鉄を置くことにより、垂直磁場の大きさが 0.50T から 0.14T へと 0.36T 減少したのに対し、20MJ コイルでは 1.44T から 0.37T へと 1.07T 減少した。これに伴い、臨界電流は、2MJ コイルでは 50A 増加したのに対し、20MJ コイルでは 90A 増加した。このため、20MJ コイルの方が線材使用量の低減率が大きくなったと考えられる。

以上より、マルチポールソレノイド型コイルにおいても、磁性体の設置が線材使用量低減に有効であるといえる。

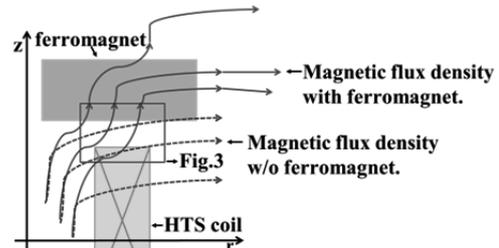


Fig.1 Schematic view of magnetic flux density in a multi-pole solenoid type HTS SMES coil with and without ferromagnet.

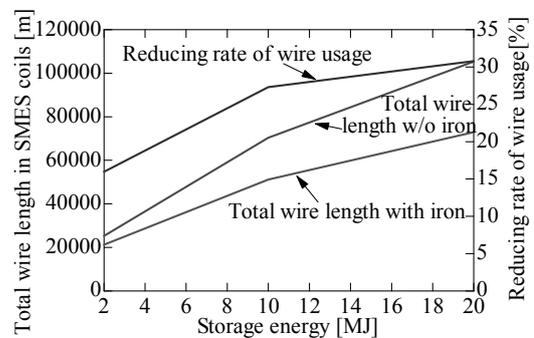


Fig.2 The relationship between storage energy and wire length.

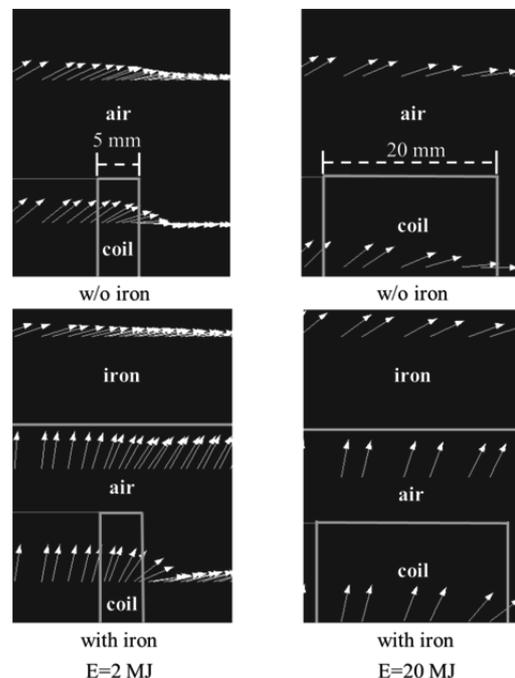


Fig.3 Magnetic flux density distribution around the upper end of the HTS SMES coil (2MJ&20MJ).

参考文献

- Mitsuho Furuse et al., "AC loss Measurement of HTS Coils with Ferromagnetic Disks", IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 13, NO. 2, (2003)

全身用 MRI マグネットの漏えい磁場の抑制

Suppression of Leakage Magnetic Flux Density for Whole Body MRI Magnets

山本 俊二, 児仁井 克己, 田邊 肇, 横山 彰一, 松田 哲也
(三菱電機)

YAMAMOTO Shunji, KONII Katsumi, TANABE Hajime, YOKOYAMA Shoichi, MATSUDA Tetsuya
(Mitsubishi Electric)

E-mail: Yamamoto.Shunji@bp.MitsubishiElectric.co.jp

1. はじめに

これまで、我々は、様々な超電導製品、極低温製品の研究開発と製造を継続推進し、既に 50 数年を経過している。この分野から生まれる製品の技術には共通項が多くあり、共通技術を絶やさず現在に至った結果、様々な製品が生まれている。MRI マグネットがその一つである。

MRI マグネットについては、1983 年に国産初の全身用超電導 MRI マグネットを製造、以来中断することなく現在に至っている。開放型/水平型共に製造する能力を有し、磁場補正については、超電導シム、常電導シム、強磁性シムいずれの方式にも即応したシミングシステムを有している。また、伝導冷却マグネット技術も別のジャンルで実現している。

MRI マグネットには様々な特徴がある。医療機器として用いられるため、装置周辺部の漏れ磁場を極端に低減する必要があり、技術開発のポイントとなっている。

ここでは、漏れ磁場低減について述べる。

2. 漏れ磁場低減超電導マグネットの諸元

漏れ磁場低減のためには、磁場発生に寄与する正のアンペアターンに、磁場発生を抑制する負のアンペアターンを加える必要があり、同一中心磁場を発生させるために、過剰なアンペアターンを加える設計となる。

漏れ磁場領域は、通常、ペースメーカーなど医療機器からの要請で、5 ガウスラインと呼ばれる。現単位系では、0.5mT の磁場ラインとなり、これより強い磁場領域がこの内側の範囲となる。

中心磁場を確保し、磁場均一度を確保しながら、漏れ磁場領域を減じるといふ、相互にリンクする性質をもつものを全て成立させることが、この技術開発のポイントである。

マグネットの諸元を表 1 に示す。

Table 1 Specification of the MRI Magnet

タイプ	超電導 水平型 全身用
中心磁場	3T / 1.5T
運転方式	永久電流モード
磁場安定度	0.1ppm/hr (仕様値)
パワーリード	着脱式 / 固定式
超電導導体	NbTi 多芯線
シムシステム	強磁性シム (超電導シム選択可)

3. 漏れ磁場低減設計

MRI マグネット設計のために、線形計画法と非線形計画法の両者を用いる。線形計画法を実行した後、線形計画法の結果を元に非線形計画法を適用する 2 段階法を採用している。漏れ磁場を最小化する工夫を加えながら設計を進める。

線形計画法

線形計画法では、1 次の関数で構成する目的関数を最小化する。まず、コイル配置可能領域を与え、電流が作る一様磁界成分・誤差磁界成分・マグネット外周部分の漏れ磁界成分をあらかじめ計算しておく。目的関数を最小化する様に線形計画法を実行する。

非線形計画法

非線形最適化では、コイル位置を少しずつ変更しながら各評価項目を計算し、各評価項目で構成する目的関数を最小化する。評価項目としては、磁界均一度、コイル AT、コイル形状、コイル最大磁界、電磁力、漏れ磁界などがある。目的関数はこれらの評価項目に重み係数 W を掛けて和を取る。マグネット設計毎に仕様が異なるため、重み係数の設定が重要である。目的関数の一例を次式に示す。

$$f = w_0 \cdot |b_0 - b_{0_obj}| + \sum_{i=1}^{i=8} w_{2i} \cdot |b_{2i}| + w_{Homo} \cdot A_{Homo} + \sum w_{stray} \cdot |(b_{stray}(r, z) - b_{5Gauss}(r, z))| + w_{at} \cdot AT + w_f \cdot F_{force} + w_B \cdot B_{max}$$

ここで、第 1 項は主磁界強度、第 2 項は各誤差磁界成分。第 3 項は均一度成分、第 4 項はもれ磁界成分、第 5 項はコイル起磁力成分、第 6 項は電磁力成分、第 6 項は最大磁場成分であり、各 W は重み係数である。

4. 漏れ磁場低減設計

設計した磁場分布を、図 1 に示す。漏れ磁場の大きさをガウス単位で示した。スケールは mm 単位である。漏れ磁場領域は $Z=4m, R=2.5m$ と小さな領域を実現している。中心磁場の大小に関わらず、漏れ磁場領域は殆ど同じである。 $B=3T$ のマグネットの場合でも、 $Z=4.5m, R=2.8m$ 以内の漏れ磁場を実現しており、マグネットの交換に際して、ほぼ互換性がある。

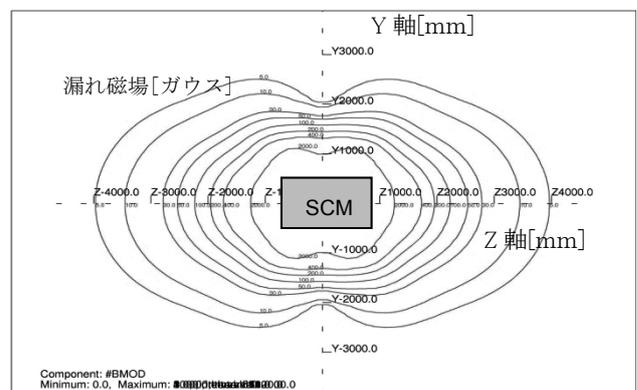


Fig.1 Leakage magnetic field analysis (case: B=1.5T)