

高温超伝導バルク磁石への逆磁場を用いた複数回パルス着磁

Iterative Pulsed-Field Magnetizing for HTS Bulk Magnet with Inversely-Applied Magnetic Fields

岡徹雄(芝浦工大); 武田晃, 清水紅旭, 小川純, 福井聡, 佐藤孝雄(新潟大); 横山和哉(足利工大); 村上雅人(芝浦工大)

OKA Tetsuo(SIT); TAKEDA Akira, SHIMIZU Kouki, OGAWA Jun, FUKUI Satoshi, SATO Takao (Niigata Univ.);

YOKOYAMA Kazuya (AIT); MURAKAMI Masato (SIT)

E-mail: okat@sic.shibaura-it.ac.jp

1. はじめに

熔融法によって作成した大型のREBCO系超伝導バルク磁石(以降バルク磁石)のパルス着磁に際して起こる発熱[1]を利用して、バルク磁石への磁束侵入を促して高磁場捕捉を狙う実験的研究の結果を報告する。GM式の極低温冷凍機を用いて60Kに冷却したバルク磁石へのパルス磁場の印加方法として、すでに磁場捕捉された試料への2回目の磁場印加時に逆方向の磁場を続いて印加した場合のその侵入磁場、捕捉磁場を比較した。

2. 実験方法

バルク磁石としてGd123系($\phi 30\text{ mm} \times t10\text{ mm}$; 新日鉄住金製)を用い、これをGM冷凍機(AISIN製GD101S)の冷却部に固定して最低30Kまで冷却した後、ヒーターによりバルク磁石の表面温度を60Kに加熱し調節した。Tableに示すように、印加磁場は1回目の磁場の向きを負方向に-3.5Tとし、2回目には正方向の磁場+3.0~+4.0Tを印加した。パルス印加中と印加後の磁場はホール素子(F. W. Bell製, BH701)と、CERNOX温度センサを用い、バルク表面中心の $r=0\text{ mm}$ から円周端部の15mmに向かって測定した。

3. 実験結果

それぞれ-3.5Tと3.5Tに磁場を印加した時の磁場侵入挙動をFig. 1に示す。あらかじめ逆向きの磁場を捕捉させると、2回目では侵入磁場が最大で2.55Tから3.77Tに増加することが分かり、発熱の影響が大きいことを示す。-3.5Tの1回目よりも2回目の方がバルク磁石中心部への磁場侵入が促進され、この結果、捕捉磁場においては、バルク磁石の中央部分の捕捉磁場は、低印加磁場領域では増加し、高磁場域では減少した。理論的には逆磁場の印加でおこる誘導電流の反転が大きく磁束の運動を鼓舞して、局所的に発熱を促進したと考えられる。Fig. 2に示すように、全体の温度上昇は系全体に与えられる磁場の大きさにのみ依存することから、最高温度ではなく、局所的な温度変化が与える磁場侵入挙動への影響の把握とその制御が、全体の磁場捕捉性能に影響すると考えられる。

4. 結論と今後の進め方

REBCO系バルク磁石への逆方向の磁場を印加するパルス着磁工程における磁場変化と温度変化を測定した。1回目の磁場印加に対して2回目の逆磁場の印加は、バルク表面の発熱を促して、バルク磁石への磁場の侵入を容易にする効果があることが判明した。バルク磁石の不均一な微細構造の分布を利用して、促進された磁場侵入を、そのまま捕捉することができれば、磁束の侵入による発熱の効果を低減して、大きな捕捉磁場が累積される可能性があることから、巨視的な不均一性を積極的に利用した着磁プロセスを通じた強磁場捕捉性能をめざす。今後は、バルク磁石への侵入磁場と捕捉磁場から新たに磁場捕捉率を定義し、これを評価することでパルス印加時の試料内部の発熱と温度上昇から、磁場捕捉の振舞いを評価していく。

Table Field Application Patterns

Title	1st pulse	2nd pulse
1st-reverse	-3.5T	+3.0T, +3.3T, +3.5T, +3.8T, +4.0T

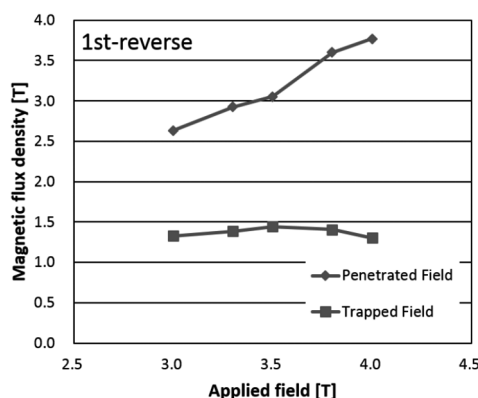
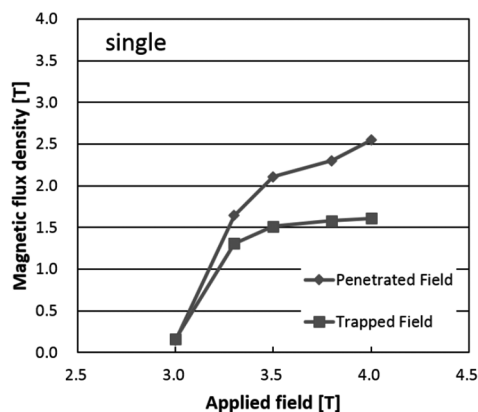


Fig.1 Penetration Fields in various pulsed-field applications

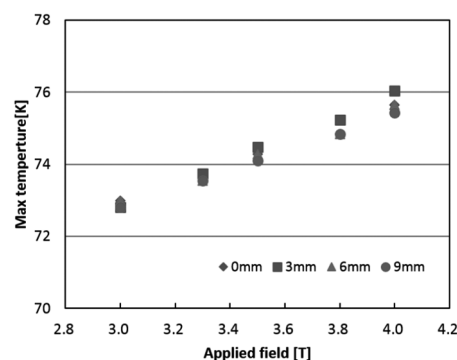


Fig.2 Temperatures at various positions after various inversely-applied fields

参考文献

1. T. Oka, et al.: Supercond. Sci. Technol., Vol. 22 (2009) 065014 (8pp)

スプリットコイルを用いたパルス着磁における異なる径の GdBaCuO バルクの捕捉磁場特性

Trapped field properties of GdBaCuO superconducting bulk with various sizes magnetized by pulsed field using split coil

下屋敷 郁陽, 藤代 博之, 内藤 智之 (岩手大); Mark Ainslie (Cambridge 大)

SHIMOYASHIKI Fumiya, FUJISHIRO Hiroyuki, NAITO Tomoyuki (Iwate Univ.); MARK Ainslie (Univ. of Cambridge)

E-mail: g0317083@iwate-u.ac.jp

1. はじめに

REBaCuO 系超電導バルク磁石は従来の永久磁石に比べはるかに強力な磁場発生源であるとして実用化に向けて研究が進められており、バルクの作製技術や着磁技術の発展が求められている。静磁場を用いて着磁を行う磁場中冷却着磁 (FCM) に対し、パルス着磁 (PFM) では磁束運動に伴う発熱によって捕捉磁場は低下する。Mark らはスプリットコイルによる着磁はソレノイドコイルに比べ冷却効率が優れるため、捕捉磁場が向上すると報告している[1]。また、Bean モデルによれば、バルク中心の捕捉磁場はバルクの径に依存して増加するとされている。本研究では、 $\Phi 30, 43, 65$ mm GdBaCuO バルクに対してスプリットコイルを用いた PFM 実験を行い、シミュレーション解析を併用することによって磁束運動と温度上昇を明らかにすることで、異なる径のバルクの利用における捕捉磁場向上の可能性を検討した。

2. 実験方法

試料として、異なる径の GdBaCuO バルク ($\Phi 30$ mm \times 14 mm; Univ. of Cambridge, $\Phi 43$ mm \times 18 mm, $\Phi 65$ mm \times 20 mm; Nippon Steel & Sumitomo Metal) を用いた。着磁にはスプリットコイル及びソレノイドコイルを用い、スプリットコイルは空芯部に磁性ヨークを挿入した。捕捉磁場はバルク表面中心で、捕捉磁場分布はバルク表面から 3 mm 上方においてホールセンサーを走査することによって測定した。温度上昇は CERNOX 温度計によりバルク補強リングの側面で測定した。

PFM 中の電磁場—熱伝導シミュレーションにはフォトン株式会社社の PHOTO-series を用い、実験環境を再現するように 3 次元有限要素モデルを構築し解析を行った。また、臨界電流密度 J_c の磁場依存性として Jirsa model を用い、すべてのバルクにおいて同じ J_c — B 特性を仮定した。

3. 結果と考察

Fig. 1 に $\Phi 65$ mm の試料における両コイルに対する各初期温度 ($T_s = 40$ K, 65 K) でのバルク表面中心の捕捉磁場の印加磁場依存性、及び代表的な捕捉磁場分布を示す。 $T_s = 65$ K において、バルク表面中心の最高捕捉磁場はスプリットコイルに比べ、ソレノイドコイルで高い値を示した。また、スプリットコイルはソレノイドコイルに比べ、低い印加磁場で最大捕捉磁場を示した。捕捉磁場分布より、ソレノイドコイルでは比較的均一な円錐型であったが、スプリットコイルにおいては不均一な分布を示した。これらは、バルク内の J_c が不均一であることを示す結果であり、スプリットコイルでの着磁においてはバルク内の温度が不均一であると考えられる。スプリットコイルに磁性ヨークを挿入すると最大捕捉磁場はソレノイドコイルに比べ向上し、2.3 T 程度を示した。

Fig. 2 に実験及び解析による異なる径のバルク表面中心の捕捉磁場の印加磁場依存性を示す。実験結果より、バルク表面中心の最大捕捉磁場は $\Phi 30$ mm に比べ、 $\Phi 43$ mm では 0.8 T 程度向上したが、 $\Phi 65$ mm では低下し、2.3 T 程度を示した。これはバルク内の温度上昇が径の増大に伴い増加したためであると考えられる。また、解析結果よりスプリットコイルによる

最大捕捉磁場はバルクの径の増大に伴い単調に増加し、 $\Phi 65$ mm において最大捕捉磁場 2.0 T 程度を示した。これらの結果から、実験においてはバルク内の温度が不均一であるために捕捉磁場分布が歪み、最大捕捉磁場が低下したと考えられる。

Fig. 1 及び Fig. 2 より、スプリットコイルを用いた PFM における異なる径の GdBaCuO バルクの捕捉磁場は、径の増加に伴い向上するものと考えられる。しかし、径の大きいバルクではバルク内の温度が不均一になるため磁場分布は歪み、捕捉磁場は低下する。

参考文献

- [1] M D Ainslie *et al.* Supercond. Sci. Technol. 29 (2016) 074003 (16pp)

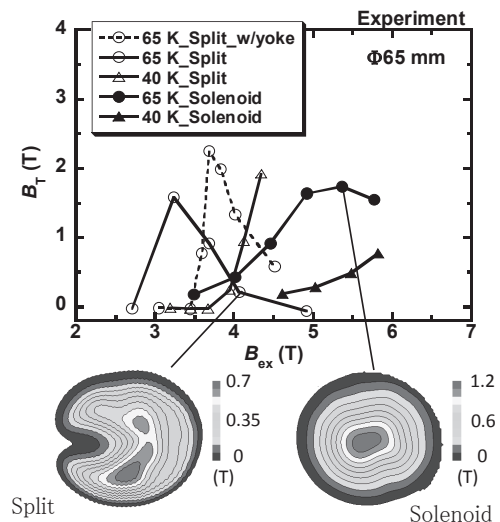


Fig. 1 Experimental results of the trapped field, B_T , as a function of the applied, B_{ex} , and trapped field properties using split coil with yoke in various bulk sizes.

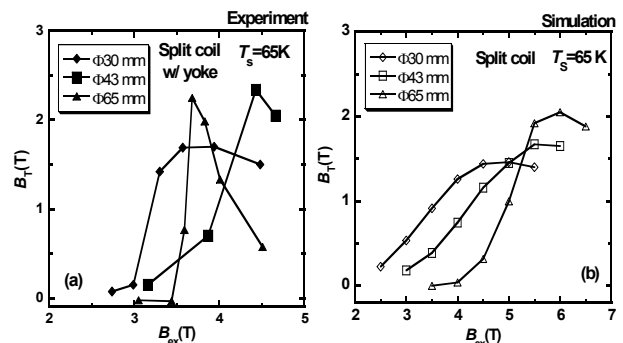


Fig.2 (a) Experimental and (b) simulation results of the trapped field, B_T , as a function of the applied field, B_{ex} , using split coil in various bulk sizes.

仕込金属組成が異なる Gd123 溶融凝固バルクの超伝導特性

Superconducting properties of Gd123 melt-solidified bulks synthesized from various cation compositions.

松丸 周佑, 箭内 優, 元木 貴則, 下山 淳一, (青学大); 淡路 智 (東北大金研)
 MATSUMARU Shusuke, YANAI Yu, MOTOKI Takanori, SHIMOYAMA Jun-ichi (Aoyama gakuin Univ.);
 AWAJI Satoshi (Tohoku Univ.)
 E-mail: c5617058@aoyama.jp

1. はじめに

REBa₂Cu₃O_y (RE123)溶融凝固バルクは液体窒素温度 77 K を超える高い臨界温度 T_c を有し、高磁場下においても高い J_c 特性を示すことから強力超伝導磁石としての応用が期待されている。RE123 溶融凝固バルクでは RE³⁺ が Ba²⁺ サイトを部分置換する RE/Ba 固溶が生じやすく、固溶量の多い領域では超伝導特性が本質的に劣化する。RE/Ba 固溶の制御方法として、溶融凝固前の BaO₂ 添加^[1]、還元雰囲気下でのバルク育成・ポストアニール^[2, 3]、RE 混合^[4]などが知られている。前回までに我々は Gd123: Gd211 = 7: 3 の仕込組成において Ba 量の変化が Gd/Ba 固溶量やバルクの結晶成長に与える影響について報告してきた。本研究では、Gd123 と Gd211 の仕込組成を変え、さらに Ba の仕込組成も制御したバルクを作製し、バルク全体の金属組成が超伝導特性に及ぼす影響を系統的に調べた。

2. 実験方法

原料粉末となる Gd123 と Gd211 は低温固相反応により同時合成した。原料粉末の仕込組成は最終的な組成がモル比で Gd123:Gd211 = 6.5:3.5 - 8: 2 となるよう調整した。さらに 7.5:2.5 の試料に対し Ba 過剰、Ba 欠損となる前駆体粉末を作製した。得られたそれぞれの粉末に Ag₂O 10 wt%、Pt 0.1 wt% を添加し、混合した粉末を一軸プレス(100 MPa)により 20 mmφ × 8 mm^l のペレットに成型した。Nd123 単結晶を種結晶としてペレットの上面中央に置き、底面加熱方式の電気炉を用いて、空气中で溶融凝固を行い、シングルドメインの Gd123 溶融凝固バルクを得た。作製したバルクを板状に切り出し、350°C まで酸素アニールを十分に行った後、1.5 mm × 1.5 mm × 1 mm^{lc} の小片試料に切り出し、走査型電子顕微鏡により微細組織を観察し、SQUID 磁束計、VSM を用いた磁化測定より超伝導特性を、粉末 XRD パターンの解析より格子定数を評価した。

3. 結果と考察

Gd123: Gd211 = 6.5: 3.5 - 8: 2 の範囲でシングルドメインの Gd123 溶融凝固バルクが得られた。Fig. 1 に種結晶下方 2 mm ($L_c = 2$ mm) の場所から切り出した小片試料の磁化測定から算出した最大ピンニング力密度 (F_p) の磁場依存性を示した。従来組成比である 7: 3 の試料に比べ Gd123 を増やした 7.5: 2.5、Gd123 を減らした 6.5: 3.5 の試料とも優れたピンニング特性を示した。これらの試料の T_c は 94 K 台で、 F_p の極大値が高磁場側へシフトしていることから弱いオーバードープ状態になっていることが示唆される。Gd123 相の直方晶性、微細組織観察による Gd211 の粒径、体積分率などの評価を通じて 7: 3 から仕込組成をずらした効果を調べている。

さらに Gd123: Gd211 = 7.5: 2.5 の試料に対し Ba 欠損組成と

した試料の 15 T までの J_c の磁場依存性を Fig. 2 に示す。Ba 欠損組成にしたことにより Gd/Ba 固溶が進行し J_c - H 特性が劣化した。種結晶から離れた位置から切り出した試料でも J_c の低下がわずかであり、位置に依らず均一な J_c 特性を有するバルク作製には有効な方法であることが示唆された。

講演では、Gd123 を減らした 6.5: 3.5 の試料に対し Ba 量を変えた試料の超伝導特性についても報告し、捕捉磁場改善に向けたバルク全体の金属組成の最適化について議論する。

参考文献

- [1] A. Hu *et al.*, *Supercond. Sci. Technol.* **17** (2004) 545 - 548.
- [2] S.I. Yoo *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.* **33** (1994) L1000 - L1003.
- [3] T. Akasaka *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **21** (2011) 2706-2709.
- [4] Y. Setoyama *et al.*, *Supercond. Sci. Technol.* **28** (2015) 015014.

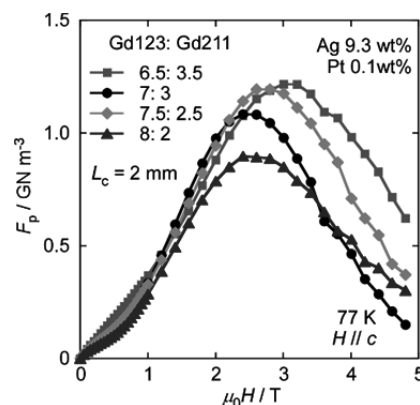


Fig. 1 Magnetic field dependence of F_p at 77 K of Gd123 melt-solidified bulks starting from various molar ratio of Gd123 and Gd211.

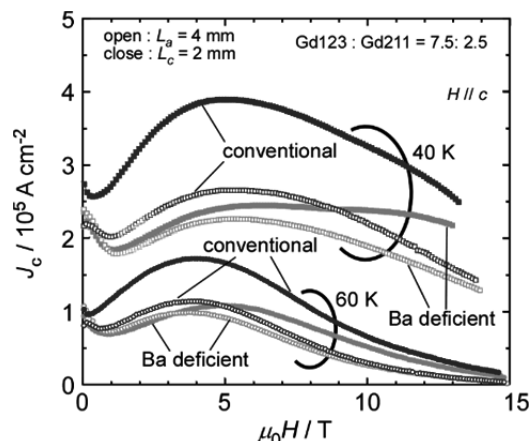


Fig. 2 Magnetic field dependence of J_c at 40 K, 60 K of Gd123 melt-solidified bulks with Ba-deficient and conventional Ba compositions.

浸透法による MgB_2 生成に対する B 粉末の微細化効果

Refining effect of B powder on MgB_2 formation in the infiltration process

高橋 裕平, 内藤 智之, 藤代 博之(岩手大)

TAKAHASHI Yuhei, NAITO Tomoyuki, FUJISHIRO Hiroyuki (Iwate Univ.)

E-mail: t5518001@iwate-u.ac.jp

1. はじめに

MgB_2 超伝導体の充填率は一般的に常圧焼結の場合 50 - 75%で臨界電流密度 (J_c) が低いため、バルク応用の際は充填率が 90%以上の高充填率バルクが必要になる。そこで圧力下焼結や浸透法等による緻密化が必須である。このうち浸透法は常圧下で高充填率のバルクが作製可能で、15.9 Kにおいてバルク表面の捕捉磁場が 2.4 T[1]と圧力下焼結によって作製されたバルクと同程度の捕捉磁場を有する。しかし、大きな B 粒に対しては十分に Mg が拡散せず未反応の B が残存し、超伝導分率を低下させるという問題を持つ[2]。したがって、原料粉末に微細な B 粉末を用いることで、上記の問題を克服すると同時に、 MgB_2 粒の微細化による磁束ピン止め力の増加が期待できる。本研究ではボールミルによって微細化された B 粉末を用いて浸透法により MgB_2 を作製し、 MgB_2 の生成と磁束ピン止め力に対する効果を検討した。

2. 実験方法

原料粉末は結晶 B 粉末 (純度 99%、粒径 45 μm 以下)、Mg 粉末 (純度 99.5%、粒径 180 μm 以下) を用い、B 粉末のボールミルは 400 rpm または 600 rpm で 1 h 行われた。片側を閉じた SUS 管 (外径 10 mm、内径 8 mm) に B 粉末を充填した後、その上に Mg 粉末を充填しアルゴン雰囲気中で密閉した。熱処理は 700 - 900°C で 1 - 24 h 行った。作製された試料は X 線回折法により相同定、SEM (scanning electron microscope) と EDX (energy dispersive X-ray spectroscopy) により微細組織観察が行われた。 J_c は SQUID (superconducting quantum interference device) 磁束計で測定した磁化ヒステリシス曲線から拡張型ピンモデルを用いて算出した。

3. 結果と考察

Fig. 1 に未粉碎の B 粉末と 400 rpm または 600 rpm でボールミルした B 粉末の SEM 像を示す。未粉碎の B 粉末には最大で数十 μm の大きさの B 粒が存在していたが、ボールミルによって数 μm 以下の均一な粒子に粉碎できることが分かった。Fig. 2 に未粉碎または 400 rpm でボールミルした B 粉末を用いて作製した試料の SEM 像と各元素の元素マップを示す。SEM 像より、浸透法でポイドの少ない緻密な試料が作製できたことが分かる。また、グレーの領域の中に黒い領域が存在しているが、各元素の元素マップおよび EDX による定量分析から、グレーの領域は MgB_2 、黒い領域は Mg_2B_{25} であることが分かった。また、これらの微細組織観察の結果より原料 B 粉末の微細化によって MgB_2 の面積分率が増加していることは明らかである。Fig. 3 に未粉碎および 400 rpm または 600 rpm でボールミルした B 粉末を用いて作製した試料の 20 K における J_c の磁場依存性を示す。原料 B 粉末のボールミルによって超伝導分率が増加した結果、低磁場における J_c が向上していることが分かる。高磁場における J_c の低下については現在考察中である。

以上の結果から浸透法において原料 B 粉末に対するボールミルは超伝導分率の増加に有効で、低磁場における J_c を向上させることが分かった。今後は B を完全に反応させるために B 粒径と熱処理条件の最適化を行う必要がある。

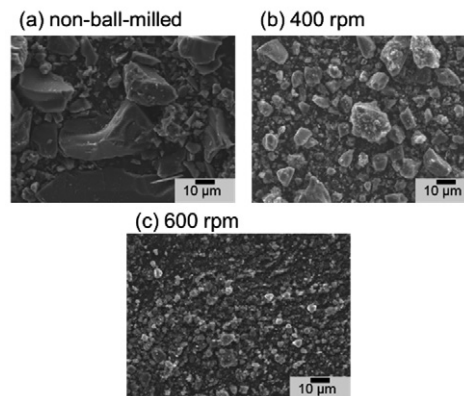


Fig.1 SEM images of the (a) non-ball-milled, (b) 400 rpm ball-milled and (c) 600 rpm ball-milled B powder.

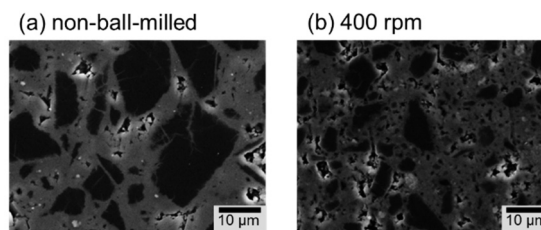


Fig.2 SEM images of (a) non-ball-milled and (b) 400 rpm ball-milled B used MgB_2 samples.

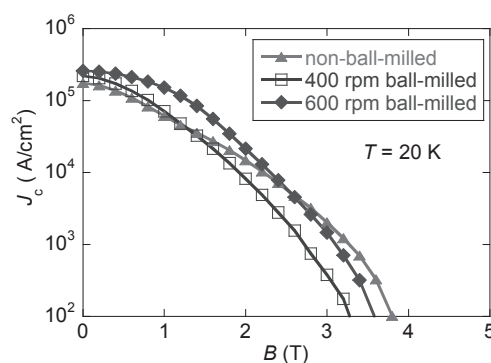


Fig.3 Field dependence of the critical current density of three MgB_2 samples using the non-ball-milled, 400 rpm ball-milled and 600 rpm ball-milled B powders.

参考文献

1. T. Naito et al.: Supercond. Sci. Technol., Vol. 29 (2016) 115003
2. A. Ogino et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 27 (2017) 6800905

着磁磁場より大きな磁場を持続的に発生できるハイブリッド型超電導バルク磁石

A new concept of a hybrid trapped field magnet lens (HTFML)

藤代 博之, 高橋 圭太 (岩手大); Mark D. Ainslie (Cambridge 大); 内藤 智之, 難波 空 (岩手大)
 FUJISHIRO Hiroyuki, TAKAHASHI Keita; Mark D. Ainslie (Univ. Cambridge); NAITO Tomoyuki, NAMBA Sora (Iwate Univ.)
 E-mail: fujishiro@iwate-u.ac.jp

1. はじめに

REBaCuO 系超電導バルク磁石は、磁場中冷却着磁 (Field-Cooled Magnetization, FCM) により「磁束ピン止め効果」を用いてバルク中に磁場を捕捉し、2016 年に 17.6 T の世界記録が樹立された。一方で、超電導コイル磁石が作る磁場を、「磁気シールド効果」を用いて内部に設置する超電導バルクで作製された磁気レンズにより磁束線を収束し、磁場増幅率 (印加磁場に対する発生磁場の比) が 1.5~2.5 程度の強磁場を実現する磁場収束レンズの研究が行われている。現状では外部磁場 8 T のもとで、超電導バルク磁気レンズ内で 12.4 T の磁場収束が実現しているが [1]、外部磁場をゼロにすると磁気レンズ効果は失われるため、超電導コイル磁石が励磁されている状態だけで有効である。本研究では着磁用超電導コイル磁石と超電導バルク磁気レンズの間に、性質の異なる超電導バルク円筒を挿入し、「バルク円筒による磁場の捕捉現象」と、「超電導バルクレンズによる磁気収束効果」を組み合わせ、印加磁場より大きな磁場を、しかも、持続的に発生できる全く新しい超電導バルク磁石 (ハイブリッド型バルク磁石: HTFML) を提案する [2]。

2. 解析方法

図 1 に解析に用いた HTFML の構造を示す。室温内径 100 mm の 10 T 超伝導コイル磁石を着磁マグネットに用いることを想定し、冷凍機のステージに GdBaCuO レンズ部と MgB₂ 円筒部をセットして冷却し、一例として図 2 に示すような(1)から(5)の手順で温度と外部磁場を制御して着磁する。

- (1) GdBaCuO レンズ及び MgB₂ 円筒を室温から $T_H = 40$ K に冷却する。この状態では GdBaCuO レンズは超電導状態であるが、MgB₂ 円筒は常電導状態である。
- (2) 外部磁場をゼロから B_{app} まで増磁する(1~5 step)。この状態では GdBaCuO レンズは ZFC (ゼロ磁場中冷却着磁) される。MgB₂ 円筒にはバルク内部に均一に外部磁場 B_{app} が進入している。
- (3) 温度を MgB₂ の $T_c (=39$ K) 以下の $T_L = 20$ K に冷却する。
- (4) 外部磁場を B_{app} からゼロに減磁する(6~10 step)。
- (5) その結果、着磁磁場 B_{app} より大きな中心磁場 B_c を持続的に発生できる超電導バルク磁石が実現する。

以上のプロセスをこれまで構築した電磁界のシミュレーション手法を用いて、中心磁場 B_c を解析した。

3. 解析結果

図 3 に $B_{app} = 3$ T の場合の中心磁場 B_c のステップ依存性を示す。MgB₂ 円筒のみの場合には、最終的に $B_T = 3$ T が捕捉されるが、HTFML では増磁過程では通常の磁気レンズのように働き、最大 6.0 T まで増加するが、減磁過程で徐々に減少し最終的に $B_c = 4.73$ T が持続的に捕捉される。また、レンズ及び円筒の両方を GdBaCuO で作製し、 $B_{app} = 10$ T で各々の温度を図 2(a) の点線のように独立に変化させた場合に、13.49 T が実現できることが明らかになった。現在、レンズの形状やサイズの最適設計を行っており、今後実証実験を行う予定である。最終的には、10 T の着磁マグネットで 15 T を越える持続可能な磁気レンズを併用した超電導バルク磁石装置の実現を目指す。

参考文献

- [1] Z. Zhang *et al.*, Supercond. Sci. Technol., **25**, 115012 (2012).
- [2] K. Takahashi *et al.*, Supercond. Sci. Technol., **31**, 044005 (2018).

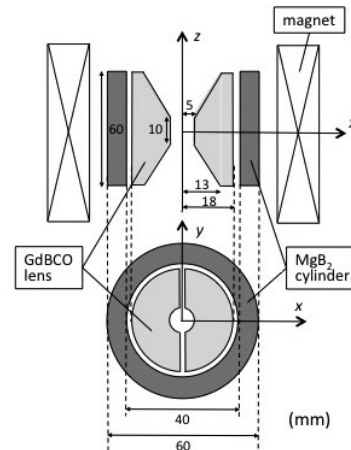


Fig. 1. Numerical model and dimensions of the MgB₂ cylinder, GdBaCuO magnetic lens and magnetizing solenoid coil.

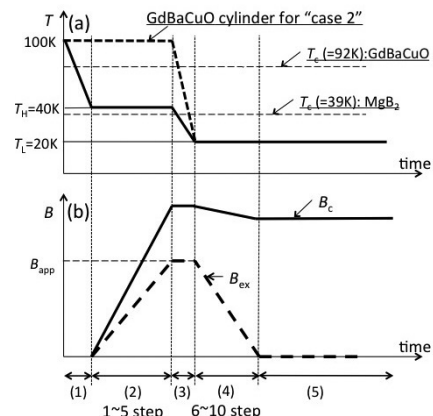


Fig. 2. Time step sequence of (a) the temperature, T and (b) the external field, B_{ex} , and concentrated magnetic field, B_c , at the center of magnetic lens, in which an MgB₂ cylinder and GdBaCuO magnetic lens are used.

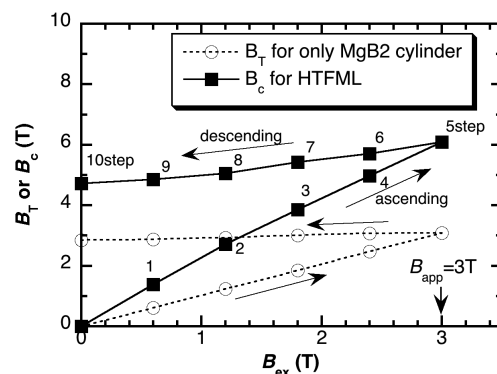


Fig. 3. Concentrated magnetic field, B_c , at the center of the magnetic lens as a function of the external field, B_{ex} , for $B_{app} = 3$ T. The trapped field, B_T , at the center of the MgB₂ cylinder for the case without the GdBaCuO lens is also shown.

多重積層したQMG[®]リングの着磁過程におけるひずみ特性

Strain behavior of multiple stacked QMG ring in magnetization process

森田 充, 手嶋 英一, 成木 紳也(新日鐵住金)

MORITA Mitsuru, TESHIMA Hidekazu, NARIKI Shinya(NSSMC)

E-mail: morita.d98.mitsuru@jp.nssmc.com

1. はじめに

優れた特性を有するQMG[®](単結晶状の123相中に211相が微細分散したバルク状酸化物超電導材料)は、1988年に初めて開発された[1-4]。その後、希土類元素(RE)を置換した種結晶を使用する単結晶育成技術により大型のQMGが製造可能となり種々の応用開発が進められた[5-6]。バルクマグネット応用は、1989年に提案されRE置換種結晶技術によりその基本形が完成した[7,8]。現在、特に低温・強磁場での着磁により数Tの磁場が捕捉可能となり、各種のバルクマグネット応用例が報告されている。

最近では、卓上NMR等のQMGリングを用いた応用が特に進展している。これらの応用に関連して、これまで主に1個のQMGリング材料に関し、強磁場着磁した時のひずみ挙動を観測し、新しい補強方法を開発してきた[9,10]。

今回、外径60mm、内径35mm、高さ20mmのGd系材を6個積層したバルクマグネットユニットに関し、上部3個のリング内周側面の40K、60Kでの着磁過程におけるひずみ挙動を測定したので報告する。

2. 実験方法

2-1 試料準備: 外周に肉厚7mmのアルミ合金をグリースを塗布しはめ込んだ外径60mm、内径35mm、厚さ20mmのGd系Ag10wt%のQMGを6個を積層し試料を作製した。上部の3個のリングの内周部分にはFig.1(a)に示す位置(●, ▲, ◆)に周方向のひずみが検出できるようにひずみゲージを貼りつけた。試料は下面を冷凍機のコールドヘッドにグリースで固定した。

2-2 着磁方法: 100Kで6Tの磁場を印加し40Kおよび60Kに冷却した後、0.05T/分で減磁した。これらの各温度での着磁過程で各ひずみゲージの値を記録した。

また、6T着磁後、40K、50K、60K、70Kでの積層リングの中心軸上の捕捉磁束密度分布を測定した。

3. 実験結果・考察

60Kおよび40Kにおける6T着磁過程でのひずみ量の変化をFig.1に示す。いずれの温度においても上端部のリング材の内周のひずみが他のリング材に対し大きくひずむことがわかる。特に40Kでは、他のリング材の1.5倍程度のひずみが発生している。これは、端部のリングは他の内側のリングに比較して、内側の捕捉磁場を維持しようとして、大きな超電導電流を誘起するためだと考えられる。

40Kと60Kとの差異に関して、40Kではより高い臨界電流密度を有しているため、端部において、より大きな電流を誘起することができる。そのため、端部のひずみがより大きくなり、内部のリングは、逆に少ない電流で内部の磁場を保持できるため、60Kに対して40Kのひずみ変化量は、僅かに小さくなっているものと考えられる。

60Kでは、リング内の軸上の捕捉磁場分布の変化から、上端部での捕捉磁場の低下が見られること、および着磁の後半ではひずみが大きく減少していることから、端部のリングの大部分でフル着磁状態になり、超電導電流が飽和状態になっているものと考えられる。さらに、端部の超電導電流が飽和状態になるため、内部の磁束を維持するためには、その分、内側のリング内の超電導電流は増加する必要があるため、内側のリ

ングのひずみは、着磁終盤においても増加傾向にあるものと考えられる。また、60Kでは中心軸上の捕捉磁束分布測定結果から、磁場中心付近では磁場分布のひずみが見られており、上(両)端部の超電導電流の減少が着磁磁場の均一性を低下させているものと考えられる。

これらの測定結果から、今後、多重に積層したリング材によるバルクマグネットユニットの強磁場トラップを考えた場合、端部のリング材を強固に補強したものにするることによって、バルクマグネットユニット全体としての強磁場化が可能になると思われる。また、その傾向は、より低温での着磁において顕著になるものと考えられる。さらに、上(両)端部のリングをフル着磁状態にしないようにすることが均一磁場の捕捉に関して、重要になると思われる。

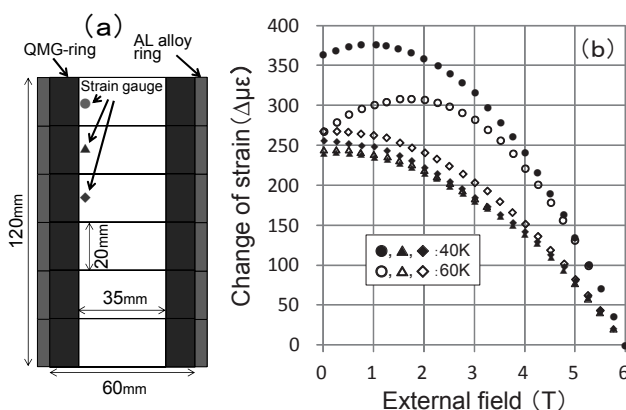


Fig. 1 Strain characteristics during 6T magnetization at 40 K and 60 K. (a) Structure of stacked ring specimen and position of strain gauge

参考文献

- 森田充, 松田昭一: New Superconducting Materials Forum News, No.10 (1988) 15
- M. Morita, et al.: Patent No. US-5508253, Priority date: 06.06.1988.
- M. Morita, et al.: Physica C 172(1990)383-387 [参考文献 1.の英訳]
- 森田 充: 博士論文「溶融成長法による大型酸化物超伝導体の作製と高臨界電流密度化に関する研究」北海道大学学術成果コレクション (HUSACP) <http://eprints.lib.hokudai.ac.jp/statistics/statslist.php?staturl=fma3serq5o2379t>
- 森田 充等: 特許登録番号: 2556401
- M. Morita et al.: Advances in Superconductivity III (1991) 733
- 森田 充: 特許登録番号: 2055511
- M. Morita, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 41 (1989) p.14
- M. Morita, et al.: Abstracts of ICMC-CSSJ Conference (2016) p.108
- 森田 充等: 新日鐵住金技報 第 407 号 (2017)

FEM を用いた超伝導バルクを用いた磁気研磨装置の評価 Evaluation of Magnetic Polishing with Superconducting Bulks by using FEM

張 睿哲, 小野又 美咲, 木内 勝, 鈴木 恵友, 田中 佑季, 中島 秀隆, 小田部 荘司(九工大)
ZHANG Ruizhe, ONOMATA Misaki, KIUCHI Masaru, SUZUKI Keisuke, TANAKA Yuki,
NAKASHIMA Hidetaka, OTABE Edmund Soji (KIT)
E-mail: ruizhe.zhang354@mail.kyutech.jp

1. はじめに

旋盤加工や磁気研磨法を始めとして様々な加工方法が利用されている。現在、機械加工を行なう際工具の干渉による制約から、中空加工法の複雑形状への適用が困難となっている。これらの問題を解決するため、Fig. 1 に示すような超伝導体の磁束ピンニング現象を利用した超伝導援用加工法 (SUAM: SUpercondutive Assisted Machining method) を考案している[1]。このSUAMは片面4極の永久磁石と超伝導バルクによって構成されており、永久磁石を空中で保持した状態で、フィールドクーラーで冷却した時に発生する磁気浮上を利用した方法である。この時、永久磁石は超伝導バルクを回転させた場合、同時に回転運動する。ここでは、磁気浮上工具が初期位置に復元しようとするため、引力、反発力、復元力及び駆動力が発生する[2]。しかしながら、これまでの研究では実験的な検証が行なわれてきたが、理論的考察は行なわれていない。そのため、本研究は有限要素法 (FEM: Finite Element Method) を用いて数値的にこれらの性能を評価すると考えられる。

ここでは、磁気浮上工具を製作し、これに働く様々な力を簡易的な実験により測定した。そして磁気浮上工具に作用する力に関して、実験結果と理論的考察を比較検証する事で、計算方法の妥当性について評価したので報告する。

2. 実験方法

本研究では、超伝導バルクは4角柱型のものを4つ用いた。また、浮上用の磁石には、回転角方向の固定のため、片面4極型のリング磁石を用いた。加工のために十分な浮上距離として超伝導バルクの上部 10 mm において永久磁石を着磁した。着磁後、上下に磁石を移動させた場合に発生する引力・反発力について、バネ秤を用いて測定した。また、着磁状態から回転させた場合の回転トルクについても測定を行なった。

3. 解析方法

磁気浮上工具の様々な力に対する有限要素法計算のために、JSOL 社製 JMAG を使用した。有限要素法の計算においては、磁界中冷却の捕捉磁界の計算のため、初めに常伝導状態の特性を与え、磁界の侵入後に超伝導状態の特性を付与することで磁界中冷却を行っている。 $E-J$ 特性の計算には n 値モデルを使用している。本研究では、 $n = 10$ である。また、解析に必要な臨界電流密度の磁界依存性 ($E-J$ 特性) は、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 超伝導バルクの実験結果を用いた[3]。

JMAG-Designer では、超伝導バルクによる永久磁石の磁気浮上力等を解析することが目的であるため、超伝導バルク、永久磁石、空気という順でメッシュを細かく分割し、解析を行った。そして磁気浮上工具における、引力、反発力、回転トルクについて数値的に評価をおこなった。

4. 結果

Fig. 2 に超伝導バルクの上部 10 mm で着磁させた場合の引力および反発力における実験結果と FEM 計算の結果の比

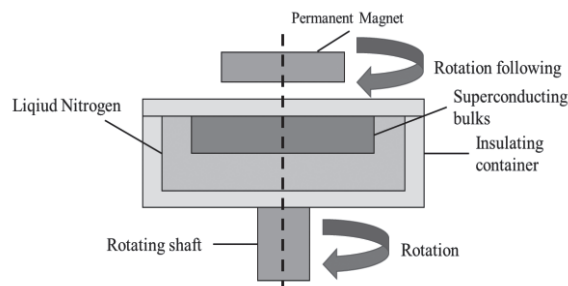


Fig. 1 SUAM (SUpercondutive Assisted Machine)

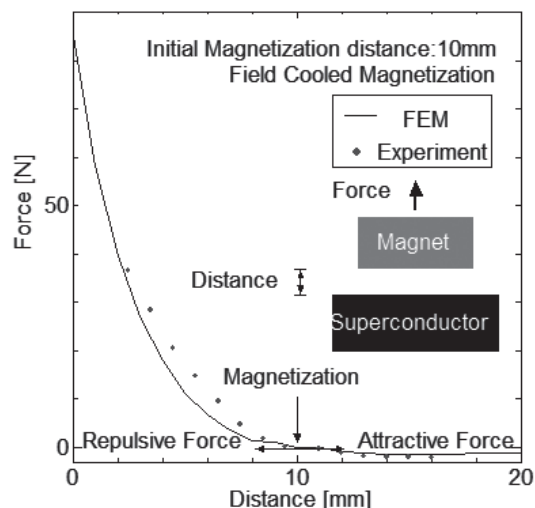


Fig. 2 Repulsive and attractive force of SUAM when magnet levitates 10 mm above superconducting bulk

較を示す。実験結果を FEM 計算により再現することができる。10 mm 付近では永久磁石に反発力が働き、上方向に押し上げる力が発生する。これに対して、10 mm 以上離れた場合、永久磁石には引力が働き、下方向へと 10 mm まで戻そうとする力が働く。研磨加工の際には引力が利用される。研磨を考えた場合、この引力はバルク上部 15 mm で 1.8 N を記録している。磁石への重力を加味した場合、3.6 N まで上昇する。この値はその他の研磨法と比較すると低いが、浮上している磁石に対して重みを与えることによって、より高い研磨力が期待できる。

参考文献

1. Y. Tanaka, et al.: JSAT, Vol. 62 No.4 (2018) p.37 – 38
2. Y. Tanaka, et al.: Abstracts of JSMEKB Conference, Vol. 70 (2017) K66
3. W. Zhai, et al.: Crystal Growth & Design, Vol. 15 (2015) p.907 – 914

真空多層断熱材ブランケット端部の包みこみによる断熱性能の低下

Degradation of thermal insulation performance due to wrapping at the edge of multi-layer insulation blanket

大森 隆夫, 向 昂太郎, 中澤 祐貴, 太田 学(帝京大); 山本 明(KEK)

OHMORI Takao, MUKAI Kotaro, NAKAZAWA Yuki, OHTA Manabu (Teikyo U.); YAMAMOTO Akira (KEK)

E-mail: Ohmori@koala.mse.teikyo-u.ac.jp

1. はじめに

真空多層断熱材(MLI)ブランケットの端部を最外層の DAM フィルムで包み込む場合がある。これにより高温面と低温面を熱的に短絡することになり、熱侵入増加をもたらすと予想される。本研究では小型液体窒素タンク(直径120mm、高さ150mm)に MLI をスイスロール方式で巻き付け、円筒側面をカッターで切断し上下2つのカップ型 MLI ブランケットとした。この切断部(slit)は2つのブランケットが突き合わせ接続するところになるが、突き合わせ部に隙間がなければタンクの熱負荷の増加が無いことを液体窒素の蒸発流量から確認した。次に MLI ブランケット端部の包み込みを模擬するため、大きさ15mm×20mmに切り取った厚さ25 μ mの両面アルミ蒸着ポリエステルフィルム(DAM)をV字型に折ったものを MLI ブランケット端部と液体窒素タンクの隙間に差し込んだ。この模擬包み込みを上下のブランケットに施し、液体窒素タンクの熱負荷増加を調べた。また包み込み接続部を DAM フィルムで覆う(patch)ことによる断熱効果なども測定した。

2. MLI ブランケット接続部からの熱侵入の研究

Q. S. Shuらは MLI ブランケットに短い切れ目(slit)などを作り、MLI の断熱性能への影響を調べた。[1] これによると、slit のように開口していない場合は熱侵入増加がないことがわかった。そこで大森らは正六角形や正五角形に切り取った MLI ブランケットを繋ぎ合わせたフラーレン型 MLI ブランケットを容量10リットルの球形タンクに適用した。[2] Q. S. Shuらの実験では始め一体で作ったブランケットの一部に切れ目を入れても、隙間が発生することはないが、フラーレン型 MLI ブランケットの場合は始めから独立した多角形状のブランケットを繋ぎ合わせるため、合わせ目に隙間が生じてしまう。我々は、小型液体窒素タンクを上下2つのカップ型ブランケットで断熱し、タンク側面に円周状の slot を作り放射熱侵入の大きさを調べた。[3], [4] 今回、同じタンクで初めから一体の MLI ブランケットを施工し、その後タンク側面に円周状の slit や slot を切りタンク熱負荷の増加を調べた。さらに、上下2つに分割してできたカップ状ブランケットの端部に前述の DAM を差し込み、端部包み込みを模擬して熱侵入量増加を調べた。

3. MLI とその施工

小型タンクに施工した MLI は栃木カネカ製 KFP-9B08 であり、小型タンクの側面にスイスロール方式で連続巻き付けした。上下底部には円形に切り取った同じ MLI を用意し、側面の MLI フィルム端部に切れ込みを入れ、その部分を底部へ折り曲げポリエステル粘着テープで円形フィルムに貼り付けた。側面と底部の MLI フィルムは一層ごとに貼り付けている。MLI フィルムの施工層数 N は30層、側面の層密度は15.8層/mmである。

4. MLI ブランケットの切り込み

液体窒素タンクに MLI を前述のように施工し断熱性能を測定した後、カッターを使い円周方向の切れ目を入れ断熱性能を測定した。切れ目の長さは円周方向に4箇所、 $\pi/4$ radian の角度範囲の場合(half slit)、全周にわたる連続した切れ目(full slit)、これに続いて下部ブランケットを1.5mmと5.5mm下げた場合(1.5mm slitと5.5mm slit)の試験を行った。次に端部包み込みを模擬する DAM フィルムを差し込み、下部ブランケットを引き上げて隙間を無くして試験を行った。(wrap) また、wrap 取り付け部を厚さ9 μ mの DAM フィルム(patch)で覆いその効果を調べた。(図1) 覆いは MLI を圧迫(tight)すると逆効果になるので、ゆるく覆うように貼り付ける(loose)ことが重要である。以上説明したブランケット端部の処理方法の状況を図2に示した。

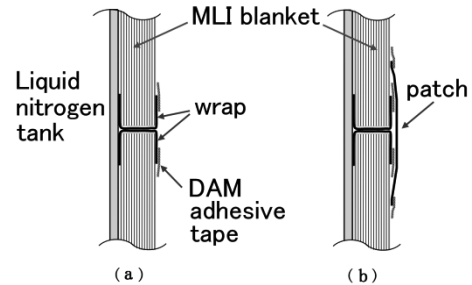


Fig.1 Wrapping of the MLI blanket

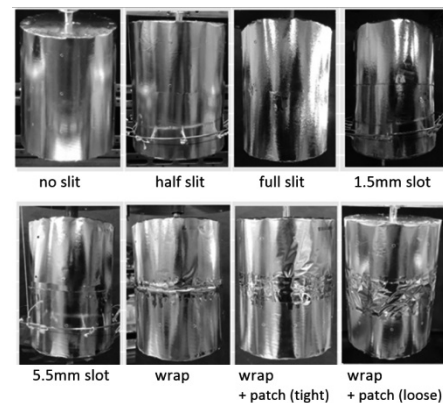


Fig.2 MLI blanket with slit, slot, or wrap

5. 断熱性能試験

性能試験法については前報で説明した。[3], [4] 試験結果を図3に示すが、縦軸の MLI 熱負荷 \dot{Q}_M とはタンク熱負荷 \dot{Q}_T から、液体窒素注入ポートからの伝導伝熱分 \dot{Q}_p を引いたものである。ポート底部の温度は校正した E タイプ熱電対で測定した。

6. 結果とまとめ

図3に各ブランケットを通した液体窒素タンクへの熱負荷を示す。MLI に切れ目がない場合と half slit では熱負荷は0.087Wであり、full slit でもほとんど熱負荷増加は見られない。Wrap をした場合は0.55Wまで増加したが、patch でゆるく覆う場合は0.38Wまで抑制することができた。

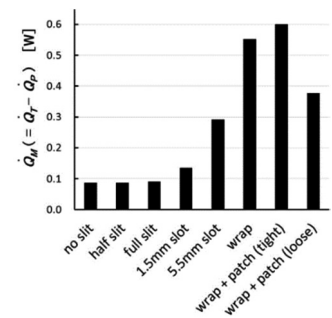


Fig.3 Heat transfer through MLI blanket

参考文献

- Q. S. Shu, et al.: Cryogenics, Vol. 27 (1987) p298
- T. Ohmori, et al.: Adv. Cryo. Eng. 55B, (2010), p928
- T. Ohmori, et al.: 24th Int. Conf. of Cryogenic Engineering (2012) p185
- T. Ohmori, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 86 (2012) p.85

超伝導送電用真空断熱配管の熱侵入量の外管温度依存性

Heat leak of the cryogenic pipe for the superconducting power transmission at different outer pipe temperatures

渡邊 裕文, 三宅 克弥, 神田 昌枝, イワノフ ユーリ, 筑本 知子,
井上 徳之, 高野 廣久, 山口 作太郎 (中部大)

WATANABE Hirofumi, MIYAKE Katsuya, KANDA Masae, IVANOV Yury, CHIKUMOTO Noriko,

INOUE Noriyuki, TAKANO Hirohisa, YAMAGUCHI Satarou (Chubu Univ.)

E-mail: h_watanabe@isc.chubu.ac.jp

1. はじめに

真空断熱配管の低温部への熱侵入は熱伝導及び輻射によって引き起こされるため、熱侵入量は配管の低温側と高温側の温度に依存する。高温超伝導を用いた超伝導送電では低温側の内管は液体窒素温度でほぼ一定なのに対し、高温側の外管は配管が設置された場所の天候、日照その他の環境に依存するため、熱侵入量は配管が設置された場所により変化する。異なる環境で超伝導送電用真空断熱配管を使用した場合の断熱性能を見積もるために、今までに測定した熱侵入量のデータに加え[1, 2, 3, 4]、新しくデータを測定することにより熱侵入量の外管温度依存性を求めた。

2. 熱侵入量測定

実験には石狩プロジェクト用に開発された真空断熱配管を用いた。配管の断面の模式図を Fig. 1 に示す。外径 267.4 mm (250A) のポリエチレン被覆炭素鋼管の外管の中に、外径 60.5 mm (50A) と 76.3 mm (65A) のステンレス鋼管の内管が設置されている。実際の送電に用いられる際には 65A の配管内には超伝導ケーブルが敷設される。50A の配管は超伝導ケーブル冷却のために送られた液体窒素を送り出し側に返す用途に用いられる。65A の配管をケーブル管、50A の配管をリターン管と呼ぶ。これらの配管には多層断熱材 (MLI) が巻かれている。又、これらの内管は繊維強化プラスチック (FRP) により外管に対して支えられている。

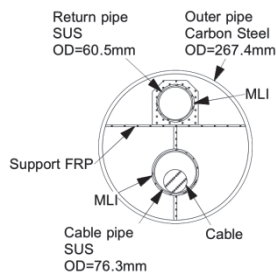


Fig. 1 Schematic cross section of the cryogenic pipe.

今までに測定したデータは、石狩の施設建設前にテスト用配管を用いて測定したデータ[1]と、石狩回線 1 (500 m) [2] 及び回線 2 (1000 m) [3, 4] において測定したデータである。今回、新たにテスト用配管を用いて以前と異なる外管温度領域で熱侵入量を測定した。テスト用配管を用いた実験が熱侵入量に比例する蒸発窒素ガス流量から熱侵入量を求めたのに対し、石狩の施設を用いて行った実験では循環する液体窒素の温度上昇、流量及び比熱から熱侵入量を求めた。

3. 熱侵入量の外管温度依存性

外管温度に対する熱侵入量の測定結果を Fig. 2 に示す。

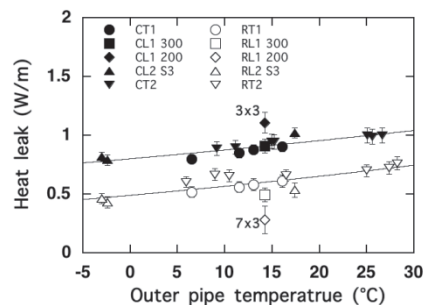


Fig. 2 Heat leak to the outer pipe temperature.

Fig. 2 の凡例で、C と R はケーブル管、リターン管を表す。T1 は石狩の施設建設前にテスト用配管を用いて行った実験の結果[1]、L1 300 と L1 200 は石狩回線 1 の 300 m 区間と 200 m 区間の結果[2]、L2 S3 は石狩回線 2 の直管区間の区間 3 の結果[3, 4]、T2 はテスト用配管を用いて今回測定した結果である。配管構造は全てについてほぼ同じであるが、MLI の施工方法が異なる。回線 1 の 200 m 区間のケーブル管が 3 層束ねた MLI を三段巻 (3×3)、リターン管が 7 層束ねた MLI を三段巻 (7×3) しているのに対し、その他の物は 21 層束ねた MLI を一段巻 (21×1) している。曲線は m_1 、 m_2 をパラメーターとして

$$y = m_1 \times \{(x + 273.15)^4 - (77.3)^4\} + m_2 \times \{(x + 273.15) - 77.3\}$$

をフィッティングした結果である。

熱侵入量は外管温度の上昇につれて増加し、測定した外管の温度領域でケーブル管で 0.2 W/m、リターン管で 0.3 W/m ほど大きくなっている。異なる測定方法で行った実験の結果が滑らかな曲線上にほぼ乗っている。又、ケーブル管への熱侵入量はリターン管への熱侵入量よりも 1.5 倍ほど大きい値を示している。MLI の巻き方により熱侵入量が異なり、リターン管では同じ 21 層でも 21×1 に比べ 7×3 の方が大幅に熱侵入量が少なく、端部の重ね合わせ部分の処理が影響を与えているものと考えられる。又、ケーブル管においては層数の少ない 3×3 の方が 21×1 に比べ熱侵入量が大きい結果となっている。

参考文献

- H. Watanabe, et al.: Physics Procedia, Vol. 67 (2015) pp. 239-244
- H. Watanabe, et al.: IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, Vol. 171 (2017) 012116
- H. Watanabe, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 27 (2017) 5400205
- H. Watanabe, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 94 (2017) p. 140

JT バルブレス JT 冷凍機

JT valve less JT refrigerator

朱 紹偉 (同济大学)

ZHU Shaowei (Tongji University)

E-mail: swzhu2008@yahoo.com

1. INTRODUCTION

The efficiency of a JT refrigerator at 4K is much higher than that of a 4K GM refrigerator with helium gas being working medium. But the JT valve block is a basic trouble for 4K JT refrigerator. In a double JT valves refrigerator, two JT valves are used for higher efficiency, which is very complex. If the pressure drop of the high pressure gas flow channel of the last stage heat exchanger in the JT refrigerator is very large, the JT valve can be eliminated or its opening area can be largely increased¹. It is not only simple, but also reliable. The cross area of the flow channel of the heat exchanger is much larger than that of the JT valve, and the opening area of the JT valve is also increased because most of the pressure drop is inside the heat exchanger.

2. STRUCTURE

Figure 1 is a pre-cooling type high pressure drop JT refrigerator for 4K cooling. The last stage heat exchanger has high pressure drop within its high pressure gas flow channel, so that JT valve can be eliminated.

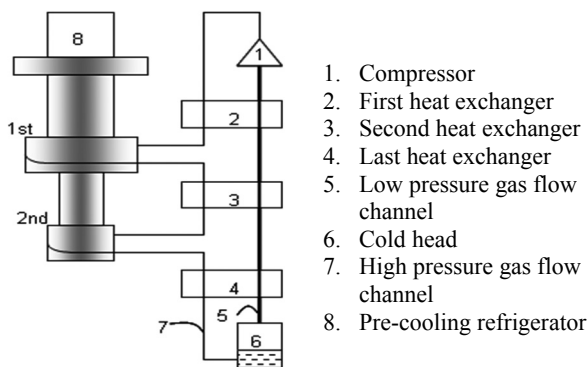


Figure 1 JT refrigerator

3. THEORETICAL EFFICIENCY

Figure 2 shows theoretical efficiency versus high pressure and pre-cooling temperature when the low pressure is 0.1MPa. Assume that the temperature difference is zero at the hot end of the last heat exchanger, there is no pressure drop at low pressure flow channel. The pre-cooling refrigerator is a Carnot refrigerator. There is optimum high pressure and optimum pre-cooling temperature for efficiency. With the pre-cooling temperature decreasing, the optimum high pressure is decreased.

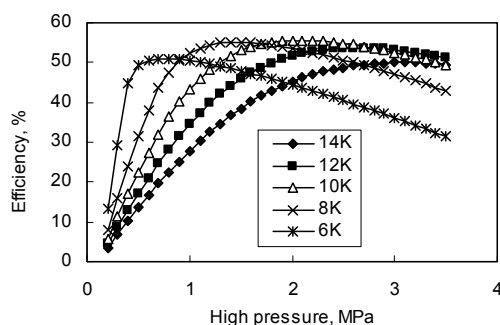


Figure 2 Efficiency versus high pressure and pre-cooling temperature

4. PRESSURE DROP

The theoretical efficiency in figure 2 cannot be realized if the high pressure gas pressure has no change in the last heat exchanger because the temperature difference becomes minus near the cold end. Figure 3 shows the temperatures of the high pressure gas and low pressure gas, and high pressure along the last heat exchanger when pre-cooling temperature is 10K, high pressure is 2.0MPa, and temperature difference is 0.2K. Position means that we monitor 7 points from the hot end to cold end of the last heat exchanger. After the temperature is lower than 8K, high pressure gas pressure must be decreased to let its temperature increase higher than the low pressure gas temperature. The reason is that the high pressure gas is in the negative area of Joule-Thomson coefficient, so decreasing pressure can increase temperature.

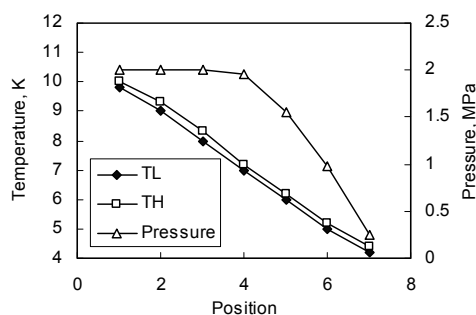


Figure 3 Theoretical pressure drop

5. TEMPERATURE DIFFERENCE

Figure 4 shows the temperature difference versus pressure at different point of the heat exchanger. At each point, there is a wide pressure changing range to let the temperature difference keep positive. So the pressure drop along the high pressure gas flow channel has no need to be controlled precisely. There is a pressure with which the temperature difference is maximum. So pressure drop also can be used for increasing temperature difference for smaller heat transfer area.

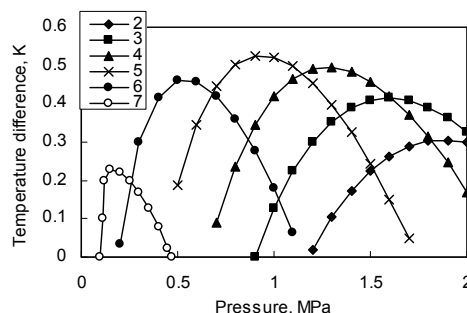


Figure 4 Temperature difference versus pressure

6. CONCLUSION

JT valve of a JT refrigerator can be eliminated or its pressure drop can be decreased largely by high pressure drop in the high pressure flow channel of the last heat exchanger.

REFERENCE

1. S. Zhu, et al.: Cryogenic refrigerator, US patent, (2003), 7207191

圧縮機性能による 4K-GM 冷凍機の冷凍能力への影響

Effect on the cooling power of a 4K-GM cryocooler by compressor performance

増山 新二 (大島商船高専); 谷田 広士 (鈴木商館); 沼澤 健則 (NIMS)
 MASUYAMA Shinji (NIT, Oshima College); TANIDA Koji (SUZUKISHOKAN); NUMAZAWA Takenori (NIMS)
 E-mail: masuyama@oshima-k.ac.jp

1. はじめに

蓄冷式 4K 冷凍機の 4K レベルでのカルノー効率¹⁾は、2% にも満たないのが現状である。その向上を目指し、冷凍機的主要部品である蓄冷材や蓄冷器構造に着目した研究が、国内の研究者を中心に行われており、わずかながらではあるものの、前進が見られている[1]。一方、電気入力を冷凍機の入力仕事へとエネルギー変換している圧縮機も、欠くことのできない主要部品である。GM 冷凍機においては、エアコン用として高い信頼性を持つ圧縮機を代用できたことが、各方面に普及した理由の一つであると言える。

今回、その圧縮機性能が冷凍能力に与える影響を調査するため、同等な電気入力²⁾で、圧縮方式の異なる 2 台の圧縮機を準備し、それらを単体、ならびに GM 冷凍機のコールドヘッドに接続し性能試験を行った。

2. 2 台の圧縮機と性能試験

GM 冷凍機に使用されている圧縮機の圧縮方式には、主にロータリー型 (rotary type) とスクロール型 (scroll type) がある。実験には、水冷式で定格 7.3 kW at 60 Hz の電気入力を持つそれら二つの圧縮機を使用した。Fig. 1 に 2 台の圧縮機の外観写真を示す。左側がロータリー型 (C300G)、右側がスクロール型 (SSC3700) で、いずれも鈴木商館社製である。

圧縮機の性能試験を実施するために、高・低圧ラインとして、長さ 5 m のフレキシブルホース (20A) をそれぞれ使用し、これらのホースを流量調整バルブ (B-1RS8, Swagelok) に接続した。また、このバルブの両端に圧力計を設置した。

バルブの流路係数と両端圧力から、バルブを通過する質量流量を求め、つぎに圧縮機等温効率 η を次式で求めた。

$$\eta = \frac{W_{iso}}{W_{in}} \times 100 [\%] \quad (1)$$

ここで、 W_{iso} は等温圧縮仕事、 W_{in} は電気入力である。2 台の圧縮機特性の比較結果を Fig. 2 に示す。SSC3700 の効率は、圧縮比に対して大きな変化は見られない。一方、C300G は圧縮比が大きくなるにつれて低下している。質量流量については、両者とも圧縮比の増加につれて低下しているが、SSC3700 が 40~50% 大きな値を示している。ここでの圧縮機性能は、ヘリウムガスの定常流による比較であるため、このまま GM 冷凍機性能へは結び付かないものの、SSC3700 を使用することで、冷凍性能の向上が期待される。

3. 冷凍能力試験

つぎに、2 段 GM 冷凍機のコールドヘッドにこれらの圧縮機を接続し、冷凍性能試験を行った。コールドヘッドは、1 W at 4.2 K モデルの RDK-408D2 (SHI) が使用され、動作周波数 1.2 Hz、ヘリウムガスの初期封入圧力 1.6 MPa 一定とした。2 段目蓄冷材は、今までの研究結果を参考に、高温側から Pb, HoCu₂, Gd₂O₃S 球が充填された三層構造とした。

性能試験は、各ステージに設置された電気ヒータを調節し、2 段目ステージを 4.2 K に固定、1 段目ステージ温度を変化させながら、4.2 K での冷凍能力を測定する方法とした。実験結果を Fig. 3 に示す。両者とも、1 段目ステージ温度が高くなるにつれて冷凍能力が向上し、その後、能力が低下する凸型の特性となっている。C300G は、40~57 K の温度領域において、1.60 W の能力を発揮しながら、ほぼ平坦な特性となっている。一方、SSC3700 は全温度範囲において C300G の能力を上回

っている。その特性は 48 K 付近にピークを持ち 1.70 W を達成した。また、この時の電気入力から %カルノー³⁾ を求めると 1.8% であった。

4. まとめ

GM 冷凍機に、同等な電気入力を持つロータリー型とスクロール型の 2 台の圧縮機を用い、4.2 K での冷凍能力の比較を行った。単体試験において質量流量が多いスクロール型圧縮機を使用することで、冷凍能力も向上し、1.70 W を達成した。質量流量の増加は、蓄冷器内のエンタルピー損失の増大につながるものの、4K 冷凍機では、冷凍能力向上のため、多くのガスを導入するべきなのかもしれない。



Fig. 1. Photographs of two types of the compressors. The left side shows C300G (rotary) and the right side shows SSC3700 (scroll).

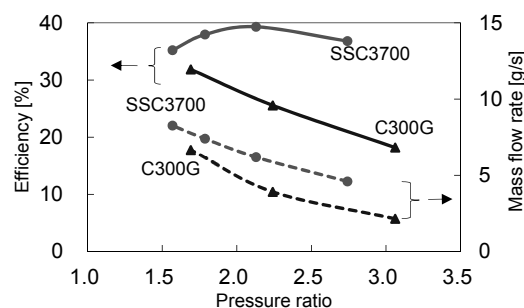


Fig. 2. Comparison of the efficiency and mass flow rate versus pressure ratio for two types of the compressors.

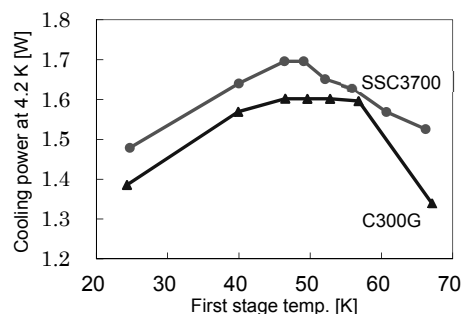


Fig. 3. Cooling power results at 4.2 K as a function of the first stage temperature.

謝辞

本研究は、中国電力技術研究財団 (試験研究 A) の一部により実施された。

参考文献

1. S. Masuyama, T. Numazawa: IOP Conf.: Mat. Sci. & Eng. **278** (2017)