

MgB₂ 線材における通電損失の数値解析と理論表式の導出Numerical calculation and derivation of theoretical formula for transport-current losses of MgB₂ wire

尾坂 亮太, 川野 友裕, 柁川 一弘(九大); 中村 武恒, 菅野 未知央(京大); 高橋 雅也, 和久田 毅(日立)

OSAKA Ryota, KAWANO Tomohiro, KAJIKAWA Kazuhiro (Kyushu University);

NAKAMURA Taketsune, SUGANO Michinaka (Kyoto University); TAKAHASHI Masaya, WAKUDA Tsuyoshi (Hitachi)

E-mail: osaka@sc.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

昨今のエネルギー問題や環境問題の改善を目指した将来の水素利用社会のインフラの 1 つとして、我々の研究グループでは、液体水素を循環もしくは移送するためのポンプを駆動する超電導誘導/同期モータを提案している[1]。これまでに、超電導誘導/同期モータの固定子巻線への使用を想定した MgB₂ 試料線材に交流通電した場合の交流損失を実験的に評価した[2]。本研究では、MgB₂ 線材で発生する通電損失を数値解析し、実験結果[2]と比較する。また、シース部で発生する渦電流損失の理論式も新たに導出する。

2. 交流損失の数値解析

MgB₂ 試料線材の諸元を Table 1 に示す。線径は 0.8 mm、フィラメント径 2R_f は 0.555 mm、臨界電流 I_c は 26.4 K において 192 A である[3]。実験結果[2]を数値的に再現するために、円柱座標系の径方向を等間隔に離散化した 1 次元差分法を用いて電磁界分布を数値解析した。超電導フィラメントの電流電圧特性として、n 値モデルを仮定した。差分法により得られた電磁界分布より、交流損失は局所的電界と電流密度の積を 1 周期にわたって時間積分することで求められる。

26.4 K、100 Hz における通電損失の実験結果と数値計算結果の比較を Fig.1 に示す。横軸の i_m は通電電流振幅を臨界電流 I_c で規格化したものである。Fig.1 より、実験結果と数値計算結果はよく一致していることが分かる。また、超電導部の損失は Bean モデルの理論値[4]とよく一致している。一方、Nb シースの損失は非常に小さいため無視できるが、Cu シースの損失が大きいため線材全体の損失は理論値よりも大きくなる。Fig.2 に 26.4 K、100 Hz における MgB₂ 試料線材内の電流分布図を示す。縦軸は各部に流れる電流を全電流で規格化している。Fig.2 より、金属シース部に流れる電流は無視できるほどの大きさで、電流はほとんど超電導フィラメント部を流れることが分かる。

3. 渦電流損失の理論式導出

上記の数値計算結果に基づいて、金属シース部で発生する単位長さ当たりの渦電流損失 Q の理論式として

$$Q = \frac{\mu_0 f S_m Q_0 i_m^2}{\rho_m} \int_0^\pi \left\{ \ln \left(\frac{R_1}{r_m} \sqrt{1 - i_m \frac{1 - \cos \tau}{2}} \right) \right\}^2 \sin^2 \tau d\tau \quad (1)$$

を導出した。ここで、f は周波数、S_m、ρ_m、r_m はそれぞれシース部の断面積、抵抗率、平均半径である。また、Q₀ = μ₀ I_c²/π である。式(1)より、渦電流損失は f と ρ_m⁻¹ に比例する。さらに、i_m が非常に小さければ i_m の二乗に比例する。式(1)で求められる渦電流損失は Fig.1 の Nb と Cu シースにおける数値計算結果とよく一致する。

謝辞

本研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の平成 20 年度産業技術研究助成事業(課題番号: 08B38006a)の一環として実施したものである。

参考文献

1. K. Kajikawa, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. 19 (2009) 1669
2. T. Kawano, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 80 (2009) p.196
3. T. Nakamura, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 80 (2009) p.43
4. H. London: Phys. Lett. 6 (1963) 162

Table 1 Specification of MgB₂ wire.

Structure	MgB ₂ /Nb/Cu
Number of filaments	1
Diameter of wire	0.8 mm
Diameter of filament, 2R _f	0.555 mm
Outer diameter of Nb	0.685 mm
Critical current at 26.4 K, I _c	192 A
n-value at 26.4 K	116
Resistivity of Nb at 26.4 K	0.61 μΩ·cm
Resistivity of Cu at 26.4 K	0.01 μΩ·cm

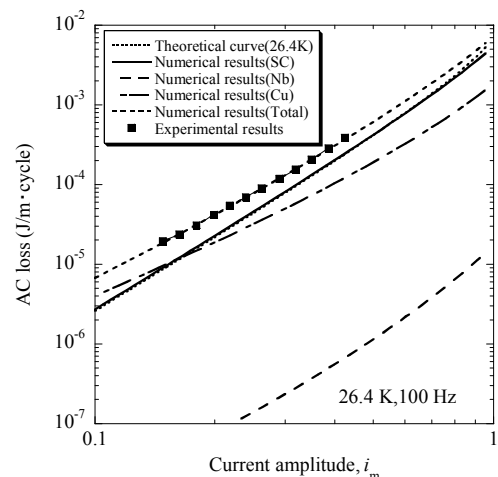
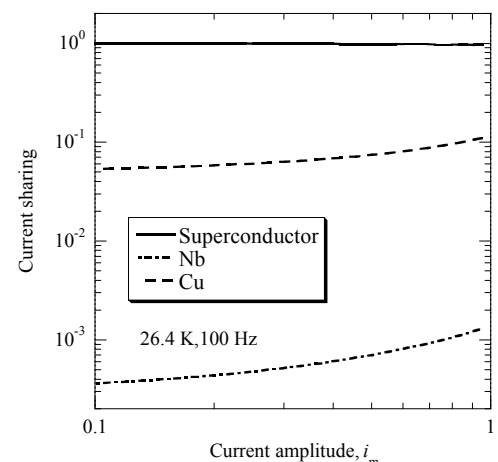


Fig.1 Comparison between experimental and numerical results of AC losses.

Fig.2 Current distribution in MgB₂ wire.

MgB₂ 薄膜の輸送特性に及ぼすマルチバンド効果の評価Understanding the multi-band effects on current transport in tilted MgB₂ films

山本 明保(東大院工); マリーナ・プッティ(イジェノバ大); アナトリー・ポリヤンスキー, アレクサンダー・ギュレビッチ, デビッド・ラバレストイエ(米国立強磁場研); チェンガン・チュアン, シャオシン・シ(米テンプル大); 下山 淳一, 岸尾 光二(東大院工)

YAMAMOTO Akiyasu(Univ. of Tokyo); PUTTI Marina(Genova Univ.); POLYANSKII Anatolii, GUREVICH Alexander, LARBALESTIER David(NHMFL); ZHUANG Chenggang, XI Xiaoxing(Temple Univ.); SHIMOYAMA Jun-ichi, KISHIO Kohji(Univ. of Tokyo)

E-mail: yamamoto@appchem.t.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

金属系超伝導体で最も高い臨界温度($T_c \sim 40$ K)を持つ MgB₂ は、液体ヘリウムフリーの 20 K 近傍での応用に向けて積極的に研究が進められている。MgB₂ は低い異方性と長い超伝導コヒーレンス長に由来して、多結晶体においても輸送電流は容易に流れると考えられてきた。しかし、近年の研究から MgB₂ 多結晶体の輸送特性は単結晶等から予想される値と比較して抑制されていることが明らかとなってきている^[1,2]。一方、MgB₂ は 2 バンド超伝導体であり、 c 軸方向の輸送を主に担う π バンドの挙動は多結晶体の輸送特性に強い影響を与えると予想されるが、電流輸送特性におけるマルチバンド効果はよく分かっていない。

本研究では π バンドが輸送特性に及ぼす影響を評価することを目的として、 c 軸が 19 度傾いたエピタキシャル MgB₂ 薄膜を作製した。この薄膜はチルト方向と垂直に発達した階段状のステップ構造を有し、ステップに対し平行に ab 面を流れる J_L と、垂直方向に ab 面と c 軸方向の両方を流れる J_T の 2 種の電流を生じる。両バンドが伝導に寄与する J_L に対して、 J_T は σ バンドが擬 2 次元的であることに由来して主に π バンドによって担われると考えられることから、これら 2 種の電流を温度、磁場を変化させて測定することで、 π バンドの輸送特性に及ぼす影響を評価した。

2. 実験方法

HPCVD(Hybrid Physical-Chemical Vapor Deposition)法により MgO(111)基板上に c 軸配向エピタキシャル MgB₂ 薄膜(Flat)を、MgO(211)基板上に c 軸が 19 度傾いたエピタキシャル MgB₂ 薄膜(Tilt)を作製した。試料サイズは 5 mm×5 mm×50 nm である。これらの薄膜に対して PPMS を用いて輸送特性の評価を、試料振動型磁力計(VSM), SQUID 磁束計を用いて磁化の評価を、磁気光学(MO)法により試料内の磁束密度分布及び J_c の評価を行った。

3. 結果と考察

無磁場下冷却後の 10 K, 40 mT の磁場下における 2 種の MgB₂ 薄膜の磁気光学像を Fig. 1 に示す。Flat 薄膜では等方的な磁束の侵入がみられるのに対し、Tilt 薄膜では異方的な磁束の侵入が観察された。この結果はステップに沿って流れる J_L が J_T よりも高いことを示す。磁気光学像より見積もった J_c の温度依存性を Fig. 2 に示す。得られた J_c は 20 K 以下で 10^7 A/cm² 以上と高い。Tilt 薄膜における 2 種の J_c の比 J_L/J_T の温度依存性を内挿図に示すが、 J_L/J_T は温度の低下とともに低くなる挙動がみられた。これは YBCO 薄膜でみられる温度依存性^[3]とは逆であり、MgB₂ の Tilt 薄膜においてピンニング以外の要因が J_c に影響を及ぼしていることを示唆する。

[1] A. Yamamoto, J. Shimoyama, K. Kishio and T. Matsushita, *Supercond. Sci. Technol.* **20**, 658 (2007).

[2] T. Matsushita, M. Kiuchi, A. Yamamoto, J. Shimoyama and K. Kishio,

Supercond. Sci. Technol. **21**, 015008 (2008).

[3] A. Polyanskii, R. L. S. Emurgo, J. Z. Wu, T. Aytug, D. K. Christen, G. K. Perkins and D. Larbalestier, *Phys. Rev. B* **72**, 174509 (2005).

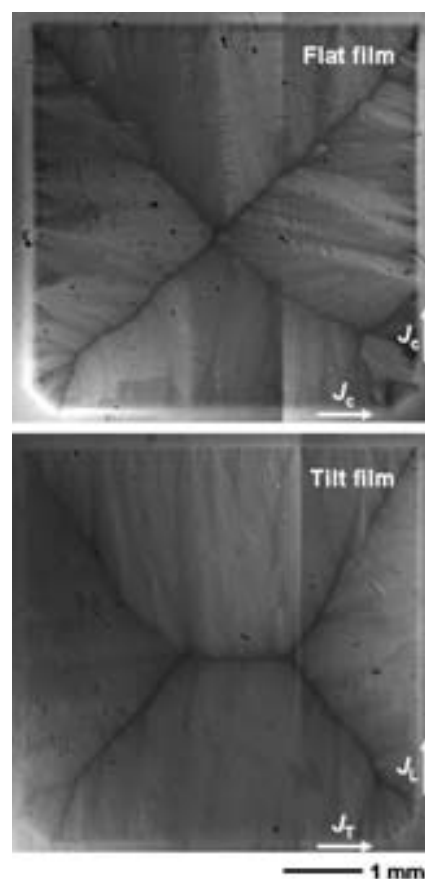


Fig. 1. Magneto-optical images at 10 K under 40 mT after zero-field-cooling on Flat (upper panel) and Tilt (bottom panel) MgB₂ epitaxial films.

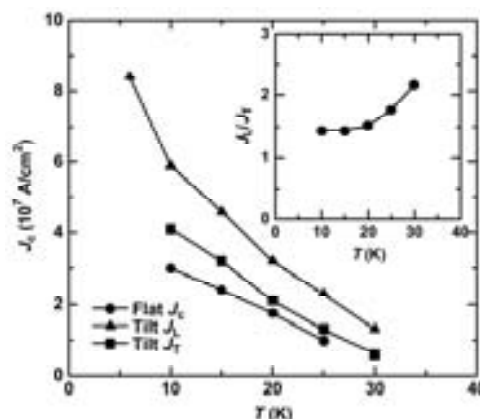


Fig. 2. Temperature dependence of J_c obtained from magneto-optical images for Flat film and Tilt film. Inset shows anisotropy of two J_c in Tilt film.

内部 Mg 拡散法により作製した MgB₂ 線材の微細組織構造

Microstructure in MgB₂ wires prepared by an internal Mg diffusion method

嶋田 雄介, 久保田 雄貴, 波多 聡, 池田 賢一, 中島 英治(九州大学);
松本 明善, 戸叶 一正, 許 子萬, 熊倉 浩明(NIMS)

SHIMADA Yusuke, KUBOTA Yuki, HATA Satoshi, IKEDA Ken-ichi, NAKASHIMA Hideharu (Kyushu University);
MATUMOTO Akiyoshi, TOGANO Kazumasa, HUR Jahmahn, KUMAKURA Hiroaki (NIMS)
E-mail: nk-y-shimada@mms.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

MgB₂ 超伝導体には、磁場中において臨界電流密度(J_c)が大きく低下するという問題点がある。この解決には、内部組織制御による充填率の向上および磁束の効果的なピンニングが必要と考えられている。

最近開発された内部 Mg 拡散(IMD : internal Mg diffusion)法⁽¹⁾では、高密度、かつ 10T 以上の高磁場領域においても高い J_c を示す MgB₂ 線材が作製可能である。本研究では、IMD 法で作製した MgB₂ 線材の微細組織観察を行い、優れた J_c をもたらす要因について考察した。

2. 試料作製および実験方法

ロッド状の純 Mg を Ta パイプに挿入後、非晶質 B 粉末(Mg:B=1.3:2(mol 比))と SiC 粉末(10 mol% SiC)の混合粉末を、Mg と Ta の隙間に充填した。その後、線引き加工を行い、単芯線を作製した。次に、作製した単芯線を Cu-10 wt% Ni パイプに 7 本入れ、線引き加工を行い、7 芯線を作製した。これに、Ar 雰囲気中で 640°C-1h の熱処理を施し、Mg 原子を B 粉末側に浸透させ、MgB₂ 線材を得た。

光学顕微鏡(OM)、走査電子顕微鏡(SEM)、透過電子顕微鏡(TEM)、走査透過電子顕微鏡(STEM)およびエネルギー分散 X 線分光(EDS)を用いた組織観察を行った。TEM、STEM 観察用の試料作製は、集束イオンビーム(FIB : Focused Ion Beam)マイクロサンプリング法により行った。

3. 結果および考察

Fig. 1 に IMD 線材の断面 OM 像(a)およびフィラメント 1 本の SEM 二次電子像(b)を示す。IMD 線材の特徴として、初期に Mg が B 側に浸透することによるフィラメント中心部のボイドが見られ、中心部には未反応の Mg が残っている。また、IMD 線材では、熱処理時、線材中心から外側に Mg が浸透して反応が進行するため、線材中心側と外径側では内部組織が異なる可能性が考えられる。そのため、TEM 観察は Fig. 1(b)中に示した Area 1~3 について行った。

Fig. 2 は、Area 1 における高角度環状暗視野 (HAADF : High-Angle Annular Dark-Field)-STEM 像とその中の円で囲んだ領域の電子回折図形である。MgB₂ の回折リングが観察される線材中心側(inner)では、高密度であることを示唆する明るいコントラストとなっている。一方、外周側(outer)は全体的に暗く、暗い斑点状に見えるボイドが無数に存在している。電子回折図形に MgB₂ の回折リングが見られず、外周側は未反応の B 粉末と SiC 粉末を主とした領域であると考えられる。線材のフィラメント中心部に近い Area 2 のホローコーン照射 TEM 暗視野像(回折波 $g = 101_{\text{MgB}_2}, 200_{\text{MgO}}, 202_{\text{Mg}_2\text{Si}}, 111_{\text{SiC}}$) (a) と電子回折図形(b)を Fig. 3 に示す。粒径数百 nm の結晶と、数十 nm の微細な結晶が存在しており、Powder-in-tube (PIT)法により作製した線材で見られるような未反応 B 粉末やボイドの混在⁽²⁾は認められない。これより、IMD 線材では MgB₂ 結晶が高密度に生成し、結晶同士の連結度が良いため、電流パス密度が向上し、 J_c が向上していると考えられる。一方、被覆管近傍の Area 3 では、高密度の結晶化領域においてクラックが見られた。以上のことから、IMD 線材の更なる

J_c の向上には、未反応領域とクラックの抑制が必要と考えられる。

本研究の一部は、文部科学省九州地区ナノテクノロジー拠点ネットワーク超顕微解析支援において実施されました。

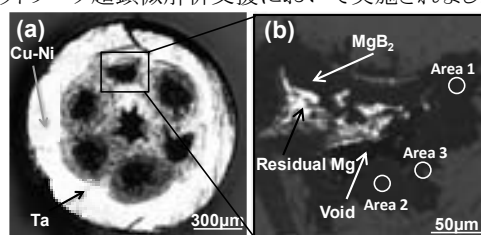


Fig. 1 Cross-sectional OM image of the seven-filaments wire (a) and a magnified SEM image of one of the filaments (b).

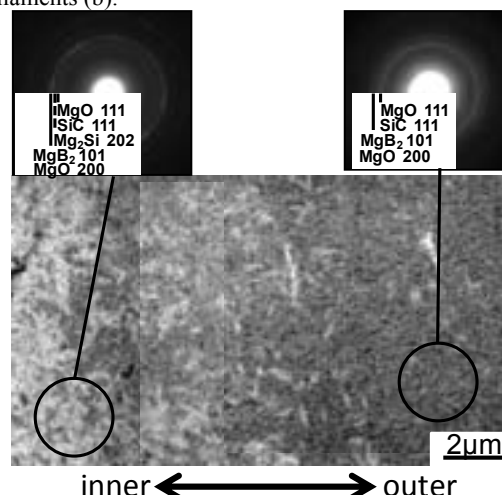


Fig. 2 HAADF-STEM image and electron diffraction patterns taken in the encircled areas.

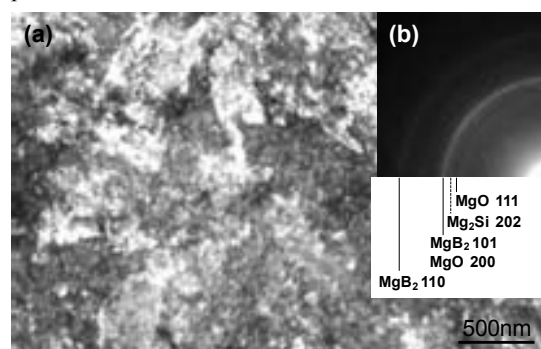


Fig. 3 Hollow-cone illuminating DF-TEM image ($g = 101_{\text{MgB}_2}, 200_{\text{MgO}}, 202_{\text{Mg}_2\text{Si}}, 111_{\text{SiC}}$) in Area 1 (a) and a corresponding electron diffraction pattern (b).

参考文献

1. K. Togano *et al.* : Supercond. Sci. Technol., **22** (2009), 015003.
2. 吉留 健ら : 低温工学, **41** (11) (2006), 510-518.

内部 Mg 拡散 (IMD) 法による MgB₂ 線材の作製 —フィラメントサイズの組織・特性への影響— Fabrication of Internal Mg diffusion processed MgB₂ wires —Influence of filament size on structure and properties—

戸叶一正(NIMS); 許子萬(東大); 松本明善, 熊倉浩明(NIMS)

TOGANO Kazumasa(NIMS); HUR Jah Mahn(Univ. Tokyo); Akiyoshi MATSUMOTO, Hiroaki KUMAKURA(NIMS)

E-mail: TOGANO.Kazumasa@nims.go.jp

1. はじめに

MgB₂ 線材の作製法としては、原料粉末を金属管に充填し線材に加工後熱処理をするパウダー・イン・チューブ法が最も一般的であるが、得られる MgB₂ コアの充填率が低く、優れた臨界電流特性が獲にくいという難点がある。我々はこれまでに Mg の拡散を利用した線材化法によって PIT 法よりも高い MgB₂ コアの充填率を有し、これによって高い臨界電流特性を示す MgB₂ 線材が得られることを示してきた。本研究では、単芯線材、ならびに単芯線材よりも細いフィラメント径を有す 7 芯および 19 芯の多芯丸線材を拡散法により作製し、フィラメントサイズが組織や超伝導特性に及ぼす影響を調べた。

2. 実験方法

内径 3.5mm、外径 6mm の Ta 管の中心に径 2mm の Mg 棒を配置し、Ta 管と Mg 棒の隙間に B+10mol%SiC 混合粉末を充填した後、径 1.3mm のワイヤーに加工した。またこのワイヤーを 7 本あるいは 19 本束ねてさらに内径 4mm、外径 6mm の Cu-10%Ni 管に挿入し、さらに加工を行って径 1.3mm の 7 芯あるいは 19 芯のワイヤーを作製した。線材加工はすべて室温で行ったが、破断等が起こること無く、最終線径まで加工することができた。これらの線材を 600–720°C で 1 時間熱処理し、組織を X 線回折ならびに SEM で調べるとともに、種々の温度、磁界中で臨界電流 I_c を測定した。臨界電流密度 J_c は、 I_c を MgB₂ を主相とする反応層の総断面積で除して求めた。

3. 結果と考察

Fig.1 に、640°C で 1 時間熱処理した、単芯、7 芯および 19 芯線材の断面写真を示す。単芯線材では、右の高倍率写真が示すように、B+SiC 層の厚さが大きいために反応層と Ta 壁の間に B+SiC の未反応層がかなり認められる。7 芯線材においては、加工後の B+SiC 層厚が減少するために、この熱処理後の未反応層も減少し、19 芯線材においては、未反応層はほとんど認められなくなる。これより、この熱処理温度においては、Mg の拡散距離は 20–30μm 程度に制限され、B 相と拡散 Mg との完全な反応を達成させるためには、B 層厚は 20μm 以下であることが必要と考えられるが、この B 層厚は本実験では 19 芯線材で達成されている。したがって、MgB₂ 反応層を増大させて高い I_c を得るためには、フィラメント数を増やして B 層厚を減少させるとが効果的と考えられる。

Fig. 2 には種々の温度で熱処理をした、単芯、7 芯ならびに 19 芯線材の 4.2K、10T における I_c を示す。熱処理時間はいずれの線材も 1 時間である。いずれの線材も熱処理温度が上昇するにしたがって I_c が向上するが、これは MgB₂ の生成量が温度と共に増大するためである。単芯線材の I_c は 7 芯あるいは 19 芯線材の I_c よりも低いが、これは単芯線材では Mg と B+SiC 層との界面の面積が小さく、したがって MgB₂ の生成量が少ないためである。一方、熱処理温度が Mg の融点である 650°C 以上になると、 I_c は温度とともに減少するが、これは結晶粒の粗大化が原因と考えられる。また、650°C 以上では Fig. 2 に示したように I_c のバラツキが大きくなるのがわかる。これは

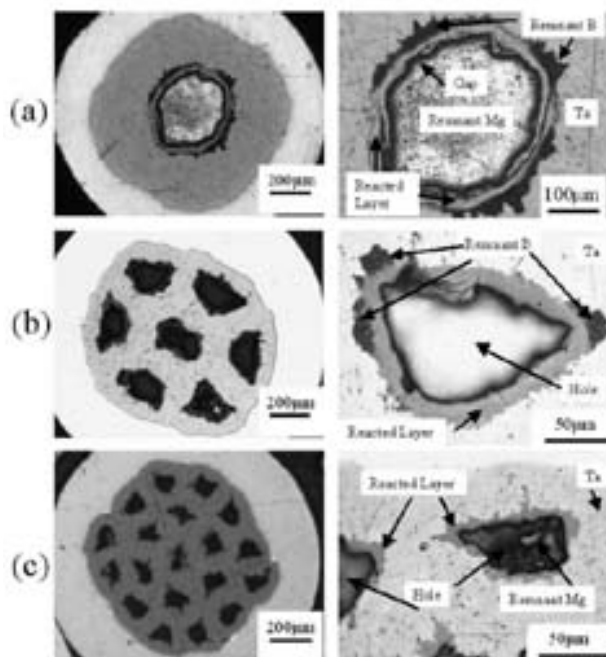


Fig. 1 Low and high magnification optical micrographs on transverse cross sections of the (a) single-filament wire, (b) 7-filament wire and (c) 19-filament wire after the heat treatment at 640°C for 1 hr.

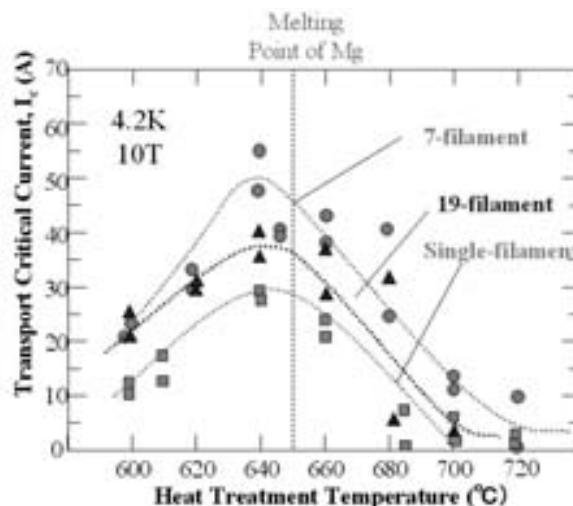


Fig. 2 I_c at 4.2K and 10T as a function of the heat treatment temperature for single, 7- and 19-filament wires.

Mg が融解して表面張力により Mg が局在化するためと考えられる。したがって拡散法線材の熱処理温度は Mg の融点である 650°C よりも低い温度が望ましい。

今回の実験で得られた最高の J_c は、4.2K、10T で 9.9×10^4 A/cm²、20T、5T で 4.9×10^4 A/cm² で、それぞれ 7 芯線材ならびに 19 芯線材で得られた。

ビタミン C を添加した MgB₂ バルクの超伝導特性

Superconducting Properties in MgB₂ Bulks Synthesized by Vitamin C Addition

中山 佳威 (日本大学理工学部); 前田 穂 (University of Wollongong); 久保田洋二 (日本大学理工学部)
 NAKAYAMA Yoshitake (CST), MAEDA Minoru (UOW); KUBOTA Yoji (CST)
 E-mail: MPD@nihon-u.ne.jp

1. はじめに

金属系超伝導体の中で最も高い超伝導転移温度を持つ MgB₂ に対して、 J_c を向上させるための様々な研究が行われている。 J_c の改善には、添加剤として SiC 等の炭素を含んだ化合物が有効であると報告されている。^[1]

我々は、MgB₂ の添加剤として Vitamin C を用い、その割合を系統的に変化させた MgB₂ バルクを作製し、その結晶性と超伝導特性を調べたので報告する。

2. 実験

用いた試薬は、B(99%,45 μ m),Mg(99.99%,3-5mm)と Vitamin C(以下VCと記す)である。VCのMgB₂に対する重量パーセントが0,1,2.5,5,10に対応するように、VCとBをそれぞれ秤量する。これらに対応するVCとBの組合せを別々に混合する。これら4種類の混合粉とB単体を別々に短冊状のプレス型に入れ、9tで10分間加重し、成形体を作製する。これらをAr雰囲気中でTa管に詰め、モル比でMg:B=1:1になるようにMg粉末を添加した後アーク溶接でTa管を封管する。このTa管を石英管に真空封入し、1100 $^{\circ}$ C-5分と710 $^{\circ}$ C-24時間の2段階熱処理を行う。最後に余分なMgを取り除くために、このTa管に穴をあけた後、石英管に真空封入し、695 $^{\circ}$ C-30分の熱処理を加え、残留Mgを除去し試料とする。試料の緒元をTable 1に示す。

試料の表面形状、組成及び J_c はSEM、XRD、SQUIDを用いて調べる。

3. 結果

Fig.1に、#1,#2,#3,#4の15K倍のSEMイメージを示す。#1よりも#2,#3,#4とVCの添加した量の増加と共に、MgB₂の粒径が細かくなっていることがわかる。また、MgB₂粒同士の密着性がよくなっているようである。

XRDパターンから、すべての試料の主相はMgB₂であり、少量のMgOがあるが、ほぼ単相試料であることがわかった。リートベルト解析より求めた各試料の格子定数 a と c は、VC濃度の増加と共に、 a は縮小し、 c は伸長している。また、MgB₂の(110)面の半値幅の一番広い試料は#3である。

Fig.2に20[K]における J_c の直流磁場依存性を示す。 J_c はSQUIDで測定した磁化曲線より、拡張されたBeanモデルを用いて計算した。VC濃度の増加と共に高磁場側の J_c がVC無添加試料の#1よりも増大し、高磁場側では、試料#3の J_c は最も大きくなった。

Fig.3に各試料 B_{c2} と B_{irr} に対する温度依存性を示す。27[K]での B_{c2} は、#3がVC無添加試料の#1の1.11倍、21[K]での B_{irr} は、#3が#1の1.13倍と増大している。

以上のことよりVCの添加は、MgB₂粒を微細化し、結晶粒界面を増大させ、また、 a 軸長を縮め、 c 軸長を伸展させることにより、電子散乱が増大し、 J_c や B_{irr} 及び B_{c2} が高磁場側で改善したと考えられる。しかし、VCが10[wt.%]まで増大すると T_c の減少が大きくなり、高磁場側では、 B_{c2} の増大が分かりにくくなっている。

参考文献

1. S. X. Dou, S. Soltanian, J. Horvat, X. L. Wang, S. H. Zhou, M. Ionescu, H. K. Liu, P. Munroe, and M. Tomsic: "Enhancement of the critical current density and flux pinning of MgB₂ superconductor by nanoparticle SiC doping" Appl. phys. Lett. 81 (2002) 3419-3421

Table 1 Specification of samples

Sample	VC/MgB ₂ [wt.%]
#1	0
#2	1
#3	2.5
#4	5
#5	10

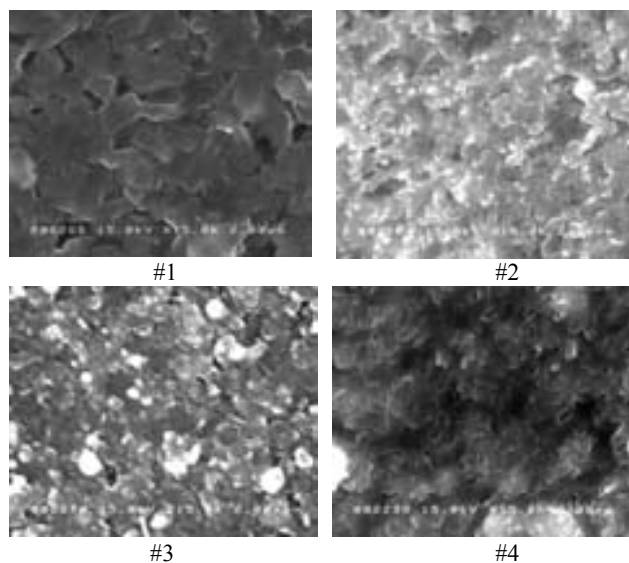


Fig.1 SEM images of MgB₂

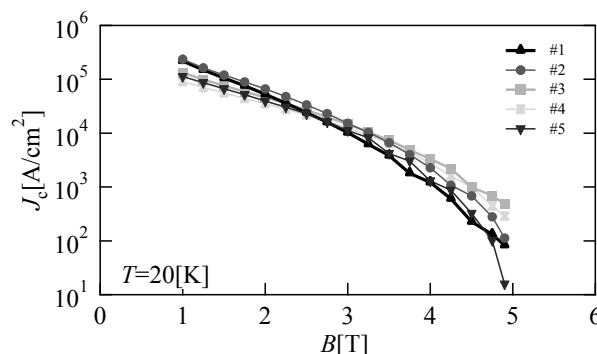


Fig.2 B vs. J_c for all samples

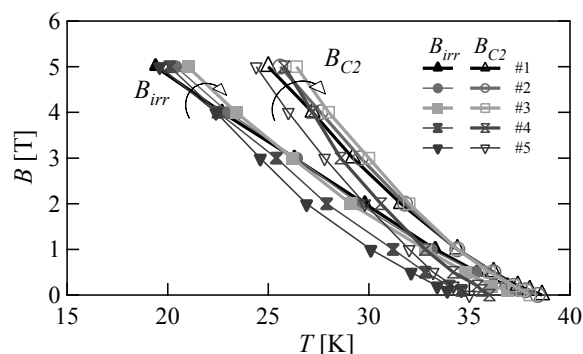


Fig.3 T vs. B (B_{c2} and B_{irr})

ステンレス鋼シース MgB₂ 細径線材の加工性と超伝導特性

Superconducting properties and workability of stainless steel sheathed MgB₂ thin wires

金澤 昌哉, 山田 豊, 太刀川 恭治(東海大); 井上 拓郎, 椛川 一弘(九大); 熊倉 浩明(NIMS)

KANAZAWA Masaya, YAMADA Yutaka, TACHIKAWA Kyoji (Tokai University);

INOUE Takuro, KAJIKAWA Kazuhiro (Kyushu University); KUMAKURA Hiroaki (NIMS)

E-mail : qyyqr273@ybb.ne.jp

1. はじめに

MgB₂ 超伝導体は 39 K の高い臨界温度を有することから液体水素中 (20 K) や液体ヘリウム中 (4.2 K) における利用が期待されている。前報では In-situ PIT 法を用いて作製したステンレス鋼/純鉄二重シース MgB₂ 線材について報告したが、本報では、ステンレス鋼シース MgB₂ 線材の加工性と超伝導特性について報告する。

2. 実験方法

Fig. 1 に In-situ PIT 法による MgB₂ 線材作製方法を示す。MgH₂ 粉末およびアモルファス B 粉末を混合し、外径 1.0 mmφ、内径 0.6 mmφ のステンレス鋼管 (SS: SUS304) に充填した。線引き加工により伸線し、断面積が 1/2 ずつ減少するように、0.20~0.10 mmφ の細径線材を作製した。熱処理は Ar 雰囲気中で 630°C×5 h 行った。細径線材を光学顕微鏡 (OM) および SEM による組織観察を行った。ビッカース硬さ試験によりステンレスシース部の加工硬化傾向を調査した。4.2 K における臨界電流 (I_c) の磁場依存性については物質・材料研究機構 (NIMS) において、臨界温度 (T_c) については九州大学で測定した。

3. 実験結果および考察

Fig. 2 に作製した直径 0.20、0.14 および 0.10 mmφ の MgB₂ 線材横断面写真を、Table. 1 に同線材の各部断面積とシース/コア比を示す。断面積は、ステンレス鋼シース部、MgB₂ コア部ともにほぼ 1/2 ずつ減少しており、概ね均一に伸線加工することができた。シース/コア比は、細線化と共に大きくなる傾向にある。これは、シース金属が加工硬化し、相対的に MgB₂ コアの方が線引き加工されやすくなるためと考えられる。線引き加工後の 0.10 mmφ (加工率 99%) のステンレス鋼シース部のビッカース硬さは 568 HV と加工硬化したが、線引き加工することができた。また、630°C×5 h 熱処理後の硬さは 404 HV に下がった。

Fig. 3 に MgB₂ 細線 (0.20~0.10 mmφ) の抵抗の温度依存性を示す。0.20 mmφ および 0.10 mmφ の onset T_c はそれぞれ 35.2 K、35.0 K であったが、0.14 mmφ では 33.4 K とやや低かった。

4.2 K、自己磁場 (0 T) における I_c 値は、0.20 mmφ で 34.0 A、0.10 mmφ で 7.5 A となり、MgB₂ コアの面積にほぼ比例し、臨界電流密度 (J_c) の値はそれぞれ 3900 A/mm² および 3750 A/mm² とほぼ同じ値であった。なお、これらの J_c 値は SS/Fe 二重シース MgB₂ 線材の約 1/2~1/3 となった。

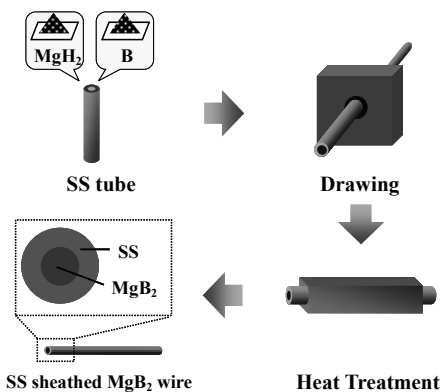


Fig. 1 Preparation procedure for SS sheathed MgB₂ wires.

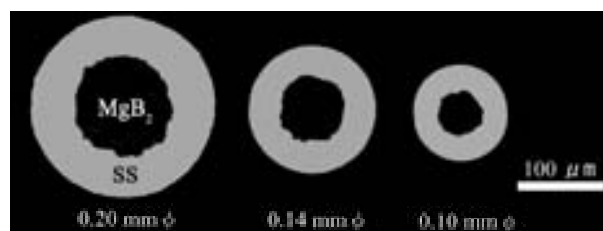


Fig. 2 Cross-section of SS sheathed MgB₂ wires of 0.10~0.20 mm in diameter.

Table.1 Cross-sectional area and sheath/core ratio of SS sheathed wires.

diameter of wires (mm φ)	cross-sectional area (mm ²)			sheath/core ratio
	overall	SS sheath	MgB ₂ core	
0.20	0.0323	0.0236	0.0087	2.70
0.14	0.0160	0.0118	0.0042	2.81
0.10	0.0082	0.0062	0.0020	3.14

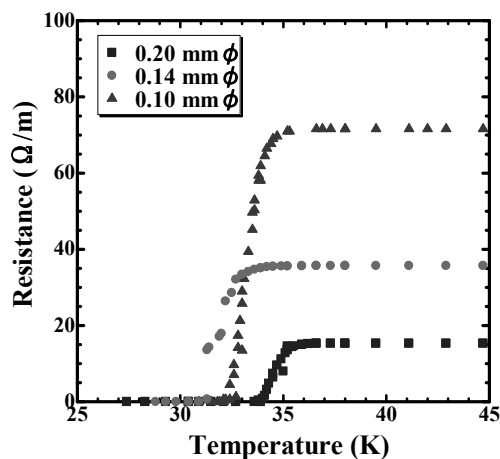


Fig. 3 Temperature dependence of resistance for the SS sheathed MgB₂ wires.

JT-60SA 平衡磁場コイル用超伝導導体の製作と試験結果

Fabrication and tests of superconductors for equilibrium field coil of JT-60SA

木津 要, 柏 好敏, 村上 陽之, 土屋 勝彦, 吉田 清 (JAEA);

尾花 哲浩, 高畑 一也, 濱口 真司, 柳 長門, 今川 信作, 三戸 利行 (NIFS)

KIZU Kaname, KASHIWA Yoshitoshi, MURAKAMI Haruyuki, TSUCHIYA Katsuhiko, YOSHIDA Kiyoshi (JAEA); OBANA Tetsuhiro, TAKAHATA Kazuya, HAMAGUCHI Shinji, YANAGI Nagato, IMAGAWA Shinsaku, MITO Toshiyuki (NIFS)

E-mail: kizu.kaname@jaea.go.jp

1. はじめに

JT-60SA 装置の EF コイルのコイル導体は NbTi 素線を用いたケーブル・イン・コンジット型(CIC)導体である[1]。導体は、メーカーより納入された超伝導撚線とジャケットを日本原子力研究開発機構(JAEA)・那珂核融合研究所内に建設された、全長約 680m の導体複合化設備で複合化することで製作される。本報告では、実機 EF 導体製造と分流開始温度(Tcs)試験結果について述べる。

2. 導体構造

EF コイルの運転シナリオにおける導体の最大経験磁場は 6.2T であるため、EF コイル導体は NbTi 素線を用いる。NbTi 素線は、JT-60SA 用に新規に設計・製作された素線で、ニッケルメッキを施されている。EF コイル導体は除熱特性を向上させるために導体中心にスパイラルで作られる冷却チャンネルを追加した CIC 型の強制冷却導体である。EF コイル導体は、円形パイプに撚線を挿入した後、矩形に圧縮・成型する方法を用いる。EF 導体は、その運転磁場・電流に応じて、4.8T-20kA 用の EF-L 導体と 6.2T-20kA 用の EF-H 導体の 2 種類の導体を製作する。Fig. 1 に導体の断面図を示す。

3. 導体複合化設備と導体製作状況

導体複合化設備では、まず、EF 用ジャケット(単長 13m)を芋継ぎ溶接することで最長で 585m の長尺ジャケットを製作する。その後、ウインチで超伝導撚線を長尺ジャケット内に引き込んだ後に、コンパクション装置と呼ばれる装置で最終断面形状に成型しながら、直径 3m のドラムに巻き取る。

JT-60SA に使用する CIC 導体の総長は 44km あり、その溶接部は 4300 箇所程度となる。超伝導コイルはトカマク装置本体に設置後は容易には分解修理できないので、溶接部の検査が重要である。溶接部の検査として、(1) CCD カメラによるジャケット内側溶接部の裏波検査、(2) ジャケット内溶接部のゴーゲージ通過確認検査、(3) X 線透過試験検査、(4) He リーク試験検査、(5) 耐圧力・気密試験が行われる。

超伝導撚線を、長尺ジャケットに引き込む際にはジャケットと撚線との間の摩擦のため、10 kN 程度の引込力が必要となることが予測された。撚線を引き込むためには、引き込み用ウインチのワイヤと撚線とを接続する必要がある。その接続方法として、ワイヤと接続可能な銅スリーブに撚線を挿入し、かきめる接続方法を開発した。この接続方法で 30 kN の引張力に耐えることを試験により確認した。実際に実機 EF-H 超伝導撚線 444 m を長尺ジャケットに引き込んでみたところ、必要な引込力は 7.7 kN 程度であり、本手法が有用であることがわかった。

4. EF-H 導体の分流開始温度測定結果

実機コイル用導体の量産を開始するためには、超伝導状態での導体性能を確認することが必要である。特に、想定される運転条件での Tcs 測定が必要である。核融合科学研究所(NIFS)の試験設備は磁場と電流値から本試験を行うのに十分な能力があるため、JAEA と NIFS との共同研究として試験設備とサンプルの設計・製作を進めてきた[2, 3]。

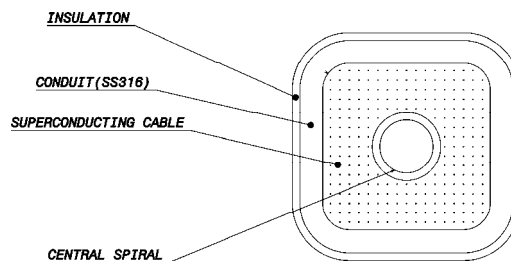


Fig. 1 Cross Section of EF-H Conductor.

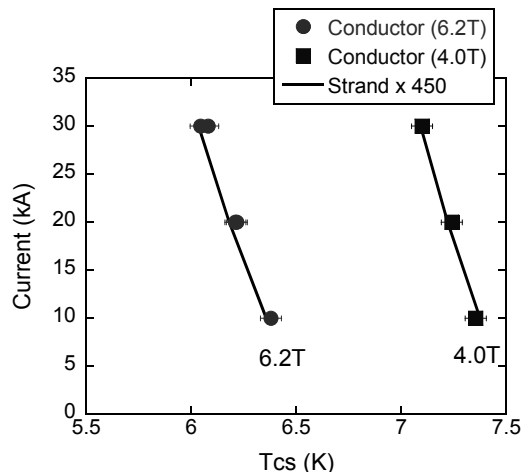


Fig. 2 Tcs measurements results of EF-H Conductor.

試験は、SHe 流量 4g/s でおこない、4.0 - 6.2 T, 10 - 30 kA の範囲での Tcs を取得した(Fig. 2)。比較として、1 本の超伝導素線の Tcs 測定結果からの予想値を実線で示した。両者は比較的良く一致しており、中心スパイラル、導体成型などによる大きな劣化がないことがわかった。Tcs は 6.2 T 通電電流 20kA において 6.21K となり、日欧により合意された最低要求値の 5.82K を上回った。

5. まとめ

EF-H 導体の Tcs 測定を行い、目標値を達成した。この結果より、EF-H 超伝導導体の量産製造が平成 22 年 3 月より開始され、平成 22 年 4 月 12 日時点で、3 本の導体が完成した。平成 22 年 9 月までに、EF-H 導体を 10 本製作し、その後、CS 導体の製作を開始する予定である。

参考文献

1. K. Kizu, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 80 (2009) p.128
2. K. Kizu, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 78 (2008) p.36
3. T. Obana, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 78 (2008) p.37

JT-60SA 平衡磁場コイル用超伝導導体の安定性評価

Stability evaluation of superconductors for equilibrium field coil of JT-60SA

村上 陽之, 市毛 寿一, 木津 要, 土屋 勝彦, 吉田 清(原子力機構);
尾花 哲浩, 高畑 一也, 濱口 真司, 柳 長門, 今川 信作, 三戸 利行(NIFS)

MURAKAMI Haruyuki, ICHIGE Toshikatsu, KIZU Kaname, TSUCHIYA Katsuhiko, YOSHIDA Kiyoshi (JAEA);
OBANA Tetsuhiro, TAKAHATA Kazuya, HAMAGUCHI Shinji,
YANAGI Nagato, IMAGAWA Shinsaku, MITO Toshiyuki (NIFS)
E-mail: murakami.haruyuki@jaea.go.jp

1. はじめに

JT-60SA 装置の平衡磁場(EF)コイルは、最大経線磁場が 6.2T と比較的小さいため、NbTi 素線を用いたケーブル・イン・コンジット導体により製作される。実機に使用される導体の量産に先立って、導体の超伝導特性を確認するため、NbTi 導体を用いた性能評価試験を日本原子力研究開発機構(JAEA)と核融合科学研究所(NIFS)が共同で実施した。

性能評価試験は、分流開始温度(Tcs)測定試験および安定性試験が実施され、Tcs および MQE (Minimum Quench Energy)が測定された。これまでに、NbTi 素線の適用可能性を実証するためのプロトタイプ導体と、高磁場(6.2T)を発生するコイルで利用する EF-H 導体の性能評価試験を実施した。本講演ではこれらの性能評価試験について報告する。

2. 性能評価試験



性能評価試験はプロトタイプ導体とEF-H導体の二種類で実施した。各導体の諸元を Table 1 に示す。試験サンプルは、Fig. 1 に示すように導体を直径 300mm の円環部を持つラケット型の形状に加工しており、スプリットコイルにより円環部に一樣な磁場を印加し試験を実施した。試験中は、導体サンプルに流す超臨界圧ヘリウム(SHe)の温度を制御することで、サンプル温度を調整した[1]。

Tcs 測定試験は、SHe 温度を徐々に上昇させ測定部に 10 μ V/m の電圧が生じた温度を Tcs とした。磁場強度を変えて Tcs を測定した結果、素線の臨界電流特性から予測される値とほぼ同じ結果を得た。Tcs 測定試験の結果については、2B-a07 にて報告する。

安定性試験では、円環部中央付近に長さ約 30 mm、180 ターンの誘導加熱用コイルを設置し、この部分を加熱することでクエンチを発生させた。誘導加熱用コイルに流れた通電電流を用いて、電磁界解析により導体部に生じる渦電流を計算し、誘導加熱による投入熱量を求めた[2]。

安定性試験は導体に供給する SHe の温度(5.9~7.2K)、圧力(0.55~0.85MPa)、流量(2.8~5.0g/s)および磁場(4.0~6.2T)、通電電流(20~30kA)を変化させ各条件における MQE を測定した。MQE の測定結果(通電電流および Tcs マージン依存性)を Fig. 2 および Fig.3 に示す。

Table 1 Specification of conductor

	Prototype	EF-H
		
Strand diameter [mm]	0.829	0.829
Cu/non-Cu ratio	1.95	2.2
Number of SC strands	486	450
Cabling pattern	3x3x3x3x6	3x5x5x6
Final twist pitch [mm]	245	160
Jacket inner size [mm]	22.6 x 22.6	21.8 x 21.8
Jacket outer size [mm]	28.0 x 28.0	27.7 x 27.7

以上の結果より、通電電流が小さくなると安定性は急速に高くなり、定格の 20 kA ではかなり安定に運転できることが分かった。通電電流 20 kA の場合、Tcs マージンが 0.3 K 以上あれば MQE は数百 mJ/cc 以上であることから、Tcs マージンを 1 K 以上にするという設計基準は、EF コイルを安定に運転する上で妥当な基準であることが確認できた。

参考文献

1. K. Kizu, et al.: Fus. Eng. Des. 84 (2009) pp. 1058-1062
2. H. Murakami, et al.: "Stability and Quench Test for NbTi CIC Conductor of JT-60SA Equilibrium Field Coil" to be published in IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 20 (2010)

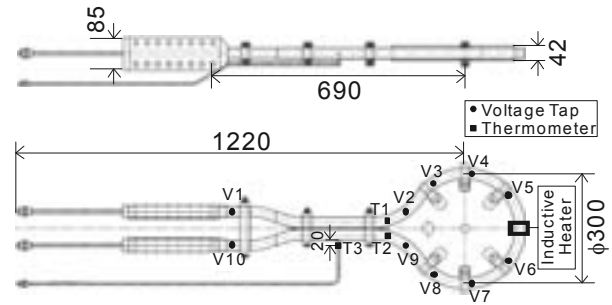


Fig. 1 Test sample (EF-H)

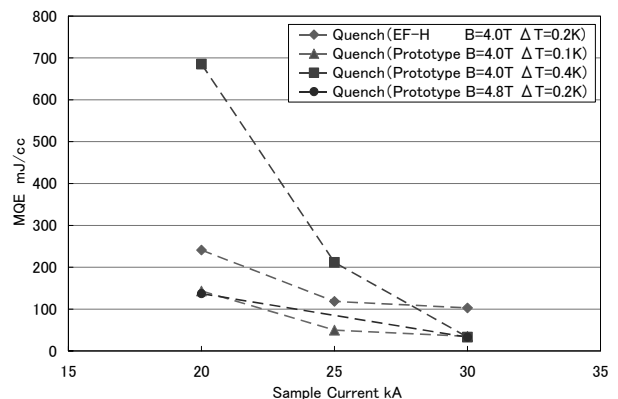


Fig. 2 Dependence of MQE on sample current

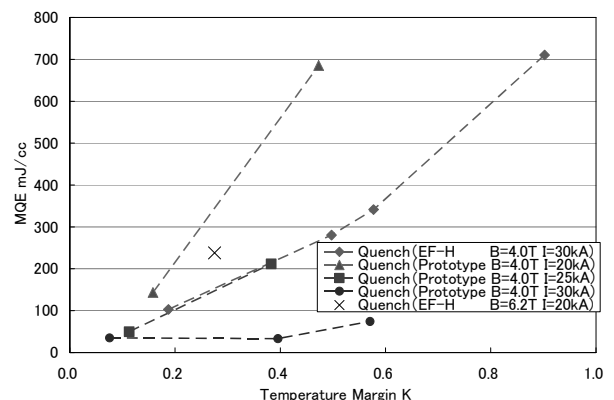


Fig. 3 Dependence of MQE on temperature margin

JT-60SA 平衡磁場コイル用プロトタイプ型 NbTi ケーブル・イン・コンジット導体の自己磁場測定

Self magnetic field measurements on a prototype NbTi cable-in-conduit conductor for JT-60SA EF coil

尾花 哲浩, 高畑 一也, 濱口 真司, 今川 信作, 三戸 利行 (NIFS); 木津 要, 村上 陽之, 土屋 勝彦, 吉田 清 (JAEA)
OBANA Tetsuhiro, TAKAHATA Kazuya, HAMAGUCHI Shinji, IMAGAWA Shinsaku, MITO Toshiyuki (NIFS)
; KIZU Kaname, MURAKAMI Haruyuki, YOSHIDA Kiyoshi (JAEA)
E-mail: obana.tetsuhiro@LHD.nifs.ac.jp

1. はじめに

2007 年度から、核融合科学研究所(NIFS)の大型超伝導導体試験装置を使用して、JT-60SA プラズマ平衡磁場(EF)コイル用ケーブル・イン・コンジット(CIC)導体を試験する計画が、NIFSと日本原子力研究開発機構(JAEA)の共同で開始された。本計画では、CIC 導体の電流分流開始温度(Tcs)測定と安定性試験を実施し、導体性能の評価を行っている[1,2]。また、各試験条件における CIC 導体内の電流分布を理解するために、CIC 導体の自己磁場測定を行っている。本講演では、EFコイル用プロトタイプ型 CIC 導体の Tcs 測定及び安定性試験における導体の自己磁場測定について発表する。

2. プロトタイプ型 CIC 導体サンプル

プロトタイプ型 CIC 導体は、Ni メッキを施した 486 本 NbTi 素線を、3(1 次撚り)×3(2 次撚り)×3(3 次撚り)×3(4 次撚り)×6(最終撚り)のケーブルリングパターンで撚り合わせており、4 次撚りと最終撚りにはステンレステープが巻かれている。また、導体中心部には、スパイラル管が配置されている。Fig.1 に、導体サンプルの概略図を示す。導体サンプルはラケット形状であり、サンプルの円環部には、外部磁場発生用スプリットコイルによって、均一な磁場を印可することが可能である[1]。導体サンプルには、電圧タップ、温度計、ホール素子、及び誘導ヒーターが設置されている。Fig.2 に、CIC 導体の周囲に配置した 5 つホール素子(B04~B07)の配置図を示す。ホール素子は、スプリットコイルからの外部磁場の影響を軽減し、且つ誘導ヒーターから発生する磁場の影響を受けないような位置に配置した。

3. 安定性試験時における自己磁場測定

本実験では、サンプル円環部への印加磁場 4 T、サンプル導体への通電電流値 20 kA、供給冷媒流量 4 g/s、圧力 0.6 MPa に保持した状態で、誘導ヒーターによりサンプル導体へ熱印加を行い、その際、サンプル導体からの発生される x 方向の自己磁場とサンプル導体電圧を測定した。Fig.3 に、クエンチが発生した際の自己磁場及び導体サンプル電圧(電圧タップ V4~V5 間)を示す。サンプル導体に熱印加を行った際、電圧が急激に発生するとともに、自己磁場の変化が起こった。その後、発生電圧が 4.6 mV を超えて、緩やかに増加している際、自己磁場の変化が収まった。以上の結果から、導体サンプルへの熱印加によって、導体サンプルで常伝導伝播が起こり、それに伴って、導体内での電流転流現象が発生したと考えられる。その後、導体サンプルが超伝導状態から常伝導状態に完全に転移して、電流転流現象が収まり、導体サンプル内の電流分布が均一になっていると考えられる。

本測定結果に基づき、線電流を用いて CIC 導体内の電流分布を検証した解析結果及び Tcs 測定時における自己磁場測定の結果は、当日発表する。

参考文献

1. K. Kizu, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 78 (2008) p.36
2. H. Murakami, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 80 (2009) p.129

3. T. Obana, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 78 (2008) p.37

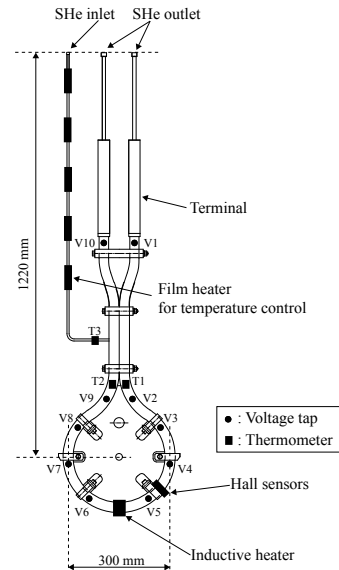


Fig.1 Schematic view of the conductor sample

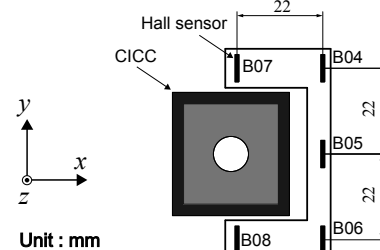


Fig.2 Layout of the hall sensors around the CIC

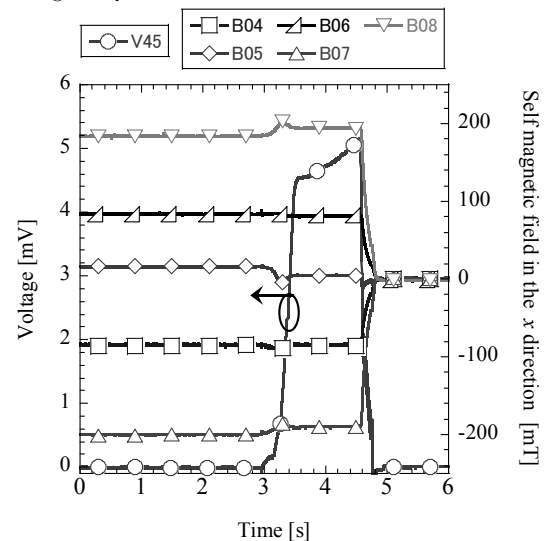


Fig.3 Measurement result of the self magnetic field in the stability test

JT-60SA マグネット用ヘリウム分配システムの設計

Design of helium distribution system for the JT-60SA magnet

米田 昌生, 神谷宏治, 本田 敦, 竹ノ内 忠, 吉田 清 (原子力機構)

KOMEDA Masao, KAMIYA Koji, HONDA Atsushi, TAKENOUCHI Tadashi, YOSHIDA Kiyoshi (JAEA)

E-mail: komeda.masao47@jaea.go.jp

1. はじめに

原子力機構の JT-60U のトカマク本体コイルを超伝導化する計画が日本と欧州連合 (EU) 間の共同プロジェクト「サテライトトカマク (JT-60SA)」として進められている。JT-60SA に用いられる超伝導コイル及び高温超伝導 (HTS) 電流リード、サーマルシールド、クライオポンプは、ヘリウム冷凍設備 (ヘリウム冷凍機、循環ポンプ) から冷却される。ヘリウム分配システムは冷凍設備から供給されるヘリウムを各負荷に分配するシステムで、配管および弁、コイル端子箱 (Coil Terminal Box : CTB)、バルブボックスから構成される。既存設備配置を満足し、クライオスタット内配置を含めた分配システムの設計を行った。

2. 構成機器と装置レイアウト

コールドボックスで作られたヘリウムは低温循環ポンプが内蔵された Auxiliary Cold Box (以下 ACB) へ送られ、そこから各機器へバルブボックスや CTB を通って分配される。ACB を起点とした各機器との関係を Fig.1 に示す。4種類の供給温度 (①3.7K②4K③50K④80K) があり、機器へ供給する。

①真空容器の不純物を除去するクライオポンプ②超伝導コイルやその支持構造物は、2台の低温循環ポンプを用いてポロイダルコイルおよびトロイダルコイルと構造物の2系統に 4.5K ヘリウムを循環させている。ヘリウム循環ポンプの熱負荷は、流量と圧損が大きいほど大きくなる。③CTB にある HTS リードへ 50K ヘリウムガスを供給する。④輻射を抑えるサーマルシールドへ 80K ヘリウムガスを供給する。

バルブボックスはヘリウムガスを分配し、CTB はマグネットへの供給電源を分配する。

3. 装置配置

JT60本体室におけるクライオスタット切断図面モデルを Fig.2 に示す。上下に 12 個のバルブボックスおよび 5 個の CTB の配置はプラズマポートのアクセス性や既存設備の配置を考慮して配置した。1本の断熱集合配管 (以下クライオライン) は隣の冷凍機室にある ACB から本体室へつながっている。クライオスタット内側に入ったクライオラインはヘッダー管として、バルブボックスおよび CTB に分配する。またバルブボックスはその戻りを集約させクライオラインへ戻るようにしている。

クライオスタット内のクライオライン配置を Fig.3 に示す。クライオラインは上から CS コイル中心穴を経て下に通って元に戻る。バルブボックスおよび CTB の配置は CS, EF コイル用は上下に配置となったが、TF コイル用は接続が上部にあるため、上部に集中した。HTS リードを冷却する 50K ラインはクライオラインから供給し、圧縮機吸入ラインに戻る。サーマルシールドに流す 80K ラインはクライオスタット下部のバルブボックスから供給される。コイルに供給する電流リードはクライオスタット内部を横断して接続されている。

クライオラインの圧損は 10~20kPa となり、コイル単体圧損の 1~2割を占めていることがわかった。

4. まとめ

クライオスタット内の詳細設計に入り、クライオスタット上部は鉛直方向 18 ポートが林立し、さらに下部は上部に比べさらに狭い空間のため、クライオライン配置計画に制限を受けた。

クライオスタット内のクライオライン配置を決め、系内圧損を計算した。この結果をもとに、ヘリウム冷凍設備の製作を担当する EU 側の担当と協議を行う。

参考文献

1. M. Komeda, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 81 (2009) p.56

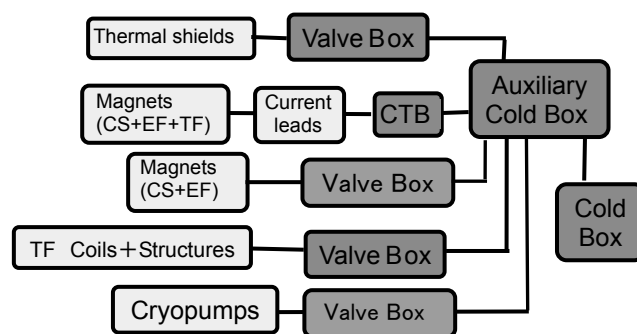


Fig. 1 Block diagram of helium distribution system

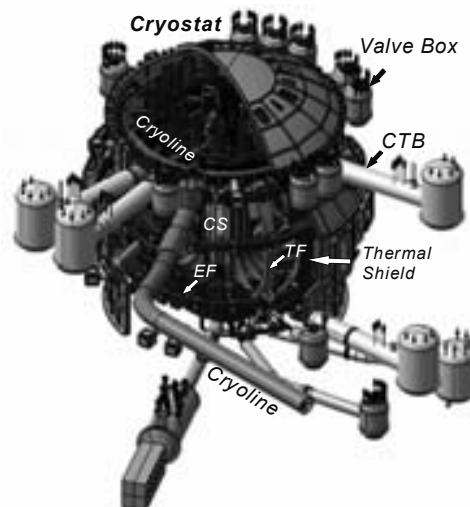


Fig. 2 Cutting model of cryostat

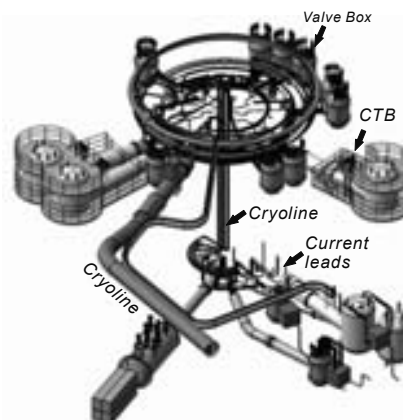


Fig. 3 Layout of cryolines in cryostat

JT-60SA サーマルシールドの設計と試作

Design and trial manufacturing of JT-60SA thermal shield

神谷 宏治, 市毛 寿一, 吉田 清 (原子力機構)
 KAMIYA Koji, ICHIGE Toshikatsu, YOSHIDA Kiyoshi (JAEA)
 E-mail: kamiya.koji@jaea.go.jp

1. はじめに

JT-60 のプラズマ閉じ込め用コイルを全て超伝導に置き換える JT-60SA は、超伝導マグネットなど 4K 設備への室温からの放射を低減するため、80K に冷却したサーマルシールドで超伝導マグネットを包囲する[1][2]。プラズマ真空容器側サーマルシールド (VVTS) は真空容器やポートとトロイダル磁場コイル (TFC) との間隔が狭いため、製作と組立に高い精度が要求される。このため試作により製作公差を確定することは設計上重要である。本講演では、VVTS の試作を行い、VVTS 製作公差と試作から得た結果について報告する。

2. サーマルシールドの構成

サーマルシールドは、超伝導マグネットに対し、プラズマ真空容器との間に真空容器サーマルシールド (VVTS)、クライオスタットとの間に位置するクライオスタット側サーマルシールド (CTS)、そして VVTS と CTS を接続する PTS で構成される。Fig.1 左図にトロイダル方向 20 度分の全サーマルシールドを示す。VVTS と PTS の放射率は機械研磨によりともに 0.15 である。CTS はステンレスパネル1枚を冷媒配管で冷却し、室温側からの放射は MLI で低減する。

3. VVTS

VVTS は渦電流を抑えるため、トロイダル方向に 18 箇所、ポロイダル方向に 2 箇所電気絶縁されており、組立時はトロイダル方向に 18 分割された VVTS を機械締結して組上げる。VVTS は 2 枚の 3mm ステンレスパネル及びその間を通る冷媒配管で構成され、冷媒配管の間隔はパネルの場所により、100mm から 150mm の範囲で変化する。

4. Inboard VVTS 試作

VVTS の試作は Fig.1 右図のようにトロイダル方向 10 度分、ポロイダル方向は Inboard 側のみの VVTS を試作し、5mm 以内の製作公差を目標とした。材質は SUS304 を用いた。Fig.2 と Fig.3 に試作 VVTS を示す。試作においては、溶接変形を低減するための振動式応力除去装置の効果、VVTS 組立時における溶接変形量、及び VVTS の透磁率を測定した。まず振動式応力除去を長さ 2m の VVTS サンプルで試みた結果、溶接変形量が 27mm から 13mm に減少し、その効果が確認できた。また VVTS 組立後、最終的な製作公差は $\pm 3\text{mm}$ となり、目標公差を満足することがわかった。最後に VVTS 各要素の透磁率を測定した結果、冷媒配管の R75 曲げ部において、透磁率が 2.5 になることが明らかになった。

5. まとめ

10 度分 Inboard VVTS の試作を行い、 $\pm 3\text{mm}$ の製作公差を達成した。長さ 2m のサンプルにおいて、振動式応力除去装置による溶接変形量の低減を確認することができた。また冷媒配管の R75 曲げ部において、透磁率が 2.5 になることも明らかとなった。

参考文献

1. K. Yoshida, et al.: Design and Construction of JT-60SA Superconducting Magnet System, APFA, P27 (2009) p.2
2. K. Kamiya, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 81 (2009) p.57

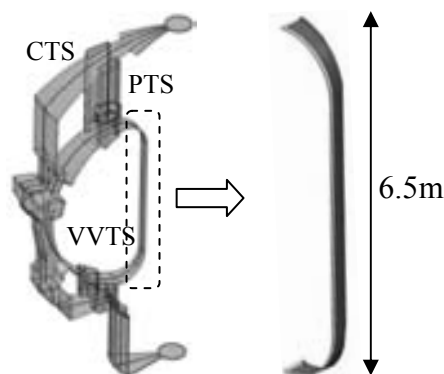


Fig. 1 Overall 20 degree thermal shield (left) and inboard VVTS (right)



Fig.3 Trial model of 10 degree inboard VVTS