

超電導マグネット

材料技術研究所 富士 広¹・花田 康²・三浦 貴博³・羽生 智²
柿本 一臣⁴・飯島 康裕⁵・直江 邦浩⁶・齊藤 隆⁷

Superconductivity Magnet

H. Fuji, Y. Hanada, T. Miura, S. Hanyu,
K. Kakimoto, Y. Iijima, K. Naoe, and T. Saitoh

イットリウム系超電導線材は、高い通電特性を有しているため、変圧器、モータ、限流器などの各電力機器への応用が検討されている。当社では、Ion Beam Assisted Deposition (IBAD) と Pulsed Laser Deposition (PLD) 法を用いてイットリウム系超電導線材の開発を行っている。本報では現在の線材開発の状況と、開発した線材を用いた伝導冷却型マグネットの通電試験の結果について報告する。

It was considered that Y-123-coated conductor was applied to power applications such as transformer, motor and fault current limiter, etc. because it has high electrical performance. Y-123-coated conductors have been developed by ion beam assisted deposition (IBAD) and pulsed laser deposition (PLD) methods. In this paper, recent progresses of the long Y-123 conductor and results of operating tests by the conduction cooling HTS test solenoid coil using Y-123 conductors at Fujikura are described.

1. ま え が き

イットリウム (Y) 系超電導線材とは、 $REBa_2Cu_3O_x$ (RE; 希土類金属) の銅酸化物超電導体をテープ状の基板に堆積させた構造の線材であり、最初に発見された銅酸化物超電導体の $YBa_2Cu_3O_x$ (YBCO) のイットリウム (Y) に基づいてこのように総称されており、YBCO の Y を Gd, Sm などに置換した構造も同様の特性を示す。Y 系超電導線材は高い通電特性を有していることから、電力ケーブルへの応用に加え、変圧器、限流器、モータなどの各電力機器への応用が検討されている¹⁾。

当社では、1991 年に Ar⁺ イオンを特定の角度で照射させながらスパッタリングすることで 3 次元に配向制御されたセラミックスを無配向の金属テープ上に成膜する技術 Ion Beam Assisted Deposition (IBAD) 法を開発した²⁾。この技術を用いて作製した 3 次元配向中間層上に Pulsed Laser Deposition (PLD) 法を用いて YBCO などの超電導層をエピタキシャルに成膜することで、通電特性の優れた線材を世界に先駆けて開発することに成功している。

現在、当社の超電導線材開発は、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) からの委託研究開発の一環として、機器応用に向けた高性能化、長尺化、低コスト化等の研究開発を行っている。NEDO の開発目標値を表 1 に示す。

電力機器においては、安定化と絶縁をほどこして導体化した超電導線材を巻線した状態で用いることが多いため、絶縁方法の検討、巻線時の固定方法や機械的強度の検討が必要となる。これらの検討のため、小型のマグネットを作製して励磁試験を行い検証した。

本報では、当社の超電導線材開発状況およびマグネットの開発状況と通電試験結果について報告する。

表 1 開発目標値 (NEDO)
Table 1. Target value of development (NEDO)

項目	高性能化線材	低コスト線材
線材長	500 m	500 m
臨界電流	300 A @ 77 K	200 A @ 77 K
線速	5 m/h	5 m/h
コスト (円 / Am@77 K, 0 T)	12	8

1 金属材料開発部主査
2 金属材料開発部
3 金属材料開発部 (理学博士)
4 金属材料開発部 主査部長 (工学博士)
5 金属材料開発部グループ長 (工学博士)
6 金属材料開発部長
7 技師長

2. 超電導線材の開発

2.1 IBAD法による中間層

図1にIBAD法の概念図を示す。IBAD法では中間層を気相法により成膜する際に、Ar等の希ガスイオンを基材に対して特定の方向から照射する。この方法によって中間層の結晶が特定の方向にそろい、3次元的に同一の方向に結晶配向したサブミクロン径の多結晶体の中間層が成膜できることが特長である。配向中間層の材料としては当初イットリア安定化ジルコニウム(YSZ)によって結晶配向性が見いだされ線材化が進められた。その後、同一の結晶構造を有する $Gd_2Zr_2O_7$ (GZO)等で同様の効果が見いだされた。GZOではYSZの約半分の時間で超電導線として利用できる半値幅 15° に到達し、大幅な高速成膜化がはかれることがわかった³⁾。

図2に開発した大型IBAD法中間層作製装置の概観写真を、表2にイオンソースの諸元を示す。イオンソースを1.1m長へと大型化を行い、成膜エリアが広がったこと

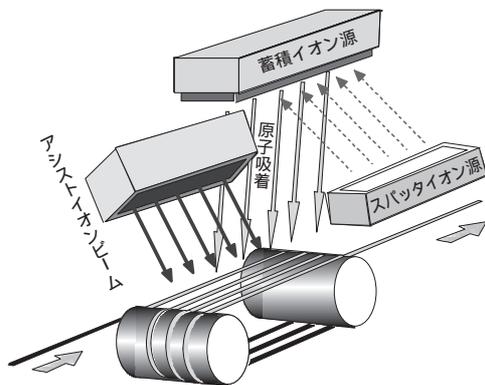


図1 IBADの概念図
Fig. 1. Conception of IBAD system.



図2 IBAD装置の概観
Fig. 2. View of new IBAD apparatus.

表2 イオンソースの諸元
Table 2. Parameter of assisting ion source.

項目	従来装置	新規装置
イオンソース	66 cm × 6.0 cm	110 cm × 15.0 cm
成膜エリア	66 cm × 10.0 cm	66 cm × 25.0 cm
作製速度	0.5 ~ 1.0 m/h	2.5 ~ 5.0 m/h
テープ長	100 ~ 250 m	~ 500 m

で、成膜速度が3倍以上、500m長の成膜が可能になった⁴⁾。

図3にIBAD法で作製した500m長のGZO中間層テープの概観写真を、図4にテープの両端の面内の結晶配向性を示す。成膜速度3m/hで半値幅 $14.8 \sim 15.6^\circ$ の良好な中間層テープが得られた。この装置を用いることで、長さ200mから500mのIBAD-GZO中間層テープが安定して得られるようになり、トータルで月産700m程度の生産が可能となった。

さらに、GZO中間層の上に第二中間層として、レーザ蒸着(PLD)法を用いて CeO_2 キャップ層を成膜することは、線材の高特性化、高速化に有効である。 CeO_2 層を配向したIBAD-GZO層上に成膜することでエピタキシャル成長し、自己配向により面内の配向性が急激に良くなる。面内の半値幅 15° 程度のGZO中間層から半値幅 4° の CeO_2 層が得られる。また CeO_2 層はレーザ蒸着(PLD)法で成膜するが、PLD法はIBAD法に比べ成膜速度が大きいので、両者を併用することで製造速度が飛躍的に向上した。

2.2 PLD法による超電導層

Y系超電導体の積層方法はレーザ蒸着法(PLD法)、有機金属蒸着法(MOD法)、有機金属化学気相蒸着法(MOCVD法)等、各種の方法が報告されている。この中で当社が用いているPLD法は、エキシマレーザを超電導体の焼結体ターゲットに照射し発生する粒子群(プラズマ)中にテープを通過させて成膜する方法である。気相法の中では格段に成膜速度が大きく、またターゲットの



図3 GZO中間層テープの概観写真
Fig. 3. View of 500 m long GZO tapes.

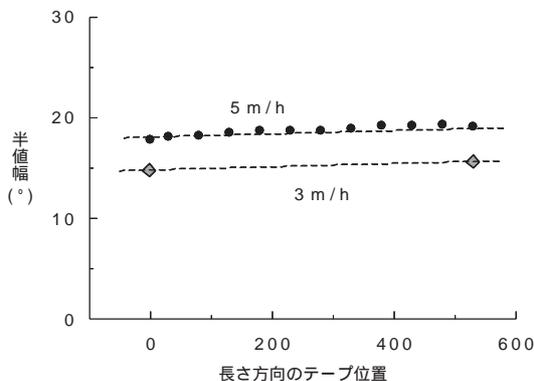


図4 500 m GZO 中間層テープの半値幅の分布
Fig. 4. Distributions of half-width values on 500 m long GZO tapes.

組成が成膜に反映されるので、組成制御が簡単で高特性の超電導膜が得られやすいことが特長である。

図5に新規に導入したPLD装置の概観写真を示す。高速化をはかるために、レーザを走査(スキャン)させて複数のプルームを作り、その中にテープを通過させ実質的に蒸着面積を増やすことで線材の製造速度を向上させる方法を採用している。

また最近では、磁場中での通電特性が良好であるため、YBCOのレアアース(RE)部分をGdに変えたGdBa₂Cu₃O_x(GdBCO)線材の開発を行っている。成膜条件はこれまでのYBCOの成膜条件とほぼ同じ条件で成膜が可能である。

これらの条件を用いて200m長の高特性GdBCO線材の開発に成功した⁵⁾。表3に線材の作製条件を、図6に作製した200m長線材の臨界電流(Ic)値の分布を示す。測定は連続測定装置で行い、液体窒素中に浸漬(77K)、無磁場で測定した。Ic値は全長にわたり最終目標値である



図5 PLD装置の概観
Fig. 5. View of PLD apparatus.

表3 線材の作製条件
Table 3. Parameter of tape manufacture.

レーザ条件	強度	600 mJ
	周波数	120 Hz
	スキャン長	6 cm
線速	20 m/h x 6層	
成膜温度	840	
酸素分圧	70 Pa	

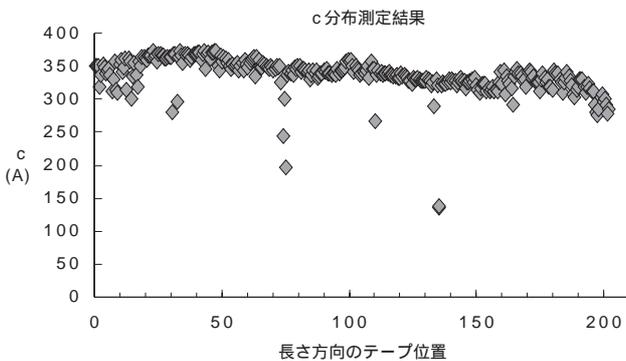


図6 200m長のGd-123線材のIc分布
Fig. 6. Distribution of Ic value on 200m Gd-123 tape.

300 Aを超える結果となった。これを超電導線材の特性を示す指標である臨界電流値×線材長(Ic・L)で示すと、Ic = 64,077 Amである。

図7に当社で作製したY系超電導線材のIc・Lの推移を示す。2001年にY系超電導線材として10m長、その後、長尺化と高特性化の研究開発の進展にともなって、2004年に100m長、124 A、そして現在の200m長、300 A超の線材開発にいたっており、世界をリードしている。

2.3 安定化層および絶縁工程

電力機器においては、安定化と絶縁を施して超電導線材を導体化する必要がある。安定化の方法はスパッタ法で銀(Ag)層を10μm成膜してアニールした後、連続安定化層複合装置を用いて、金属テープをSnはんだによりラミネートする。ラミネートの線速は100m/hが可能である。図8に銅(Cu)テープを複合した断面図を示す。複合する材質としては、モータ、変圧器向けの供給線材にはさらなる安定化のために銅テープを複合する。限流器向けには、超電導からノーマルへの転移(SN転移)時の抵抗の差を利用するため、高抵抗なNi合金を複合している。図9に絶縁したテープ線材の概観写真を示す。絶縁はポリイミドテープをラップ巻きして行っている。

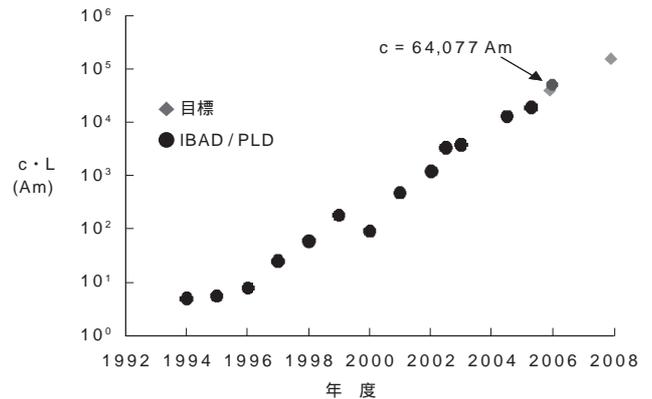


図7 Y系超電導線材のIc・Lの推移
Fig. 7. Progress of Ic・L values in Fujikura.



図8 Cu安定化層複合線材
Fig. 8. Cross section view of Y-123 with Cu stabilizer.



図9 絶縁後の導体の概観
Fig. 9. View of Y-123 conductor with insulation.

3. 超電導マグネット

3.1 超電導マグネットの特長

超電導線材は電気抵抗が0という超電導特有の現象を利用し、通常の銅線やアルミ線などの金属線材では得られない高い通電電流を得ることができるため、超電導の発見当初よりマグネットへの適用が検討されている。特にNbTi, Nb₃Snなどの金属系超電導線材では、金属の伸線技術を用いることにより比較的容易に長尺な線材の加工が可能であり、また線材の形状が丸線であるため、比較的容易に撚線や巻線加工ができることから積極的にマグネットへの適用が進められた。金属系超電導線材の適用先としては、高磁場マグネット、核磁気共鳴装置、磁気浮上式鉄道などが検討され、超電導発電機などの交流応用も検討された。しかしながら、金属系超電導線材は液体ヘリウムを溶媒とするような極低温への冷却を必要とするため冷却コストがかかる、比熱の小さい領域での運用のため熱的安定性が小さいなどの問題があった。

酸化物超電導線材では、比較的長尺化が容易なBi系超電導線材で先にマグネットへの適用が検討され⁶⁾、シリコン単結晶引き上げ用マグネット、船舶用モータへ適用されている。

近年Y系超電導線材においても長尺化が進んでいること、Bi系超電導線材に比べ、液体窒素中温度において磁場化での臨界電流が大きいことから、より広い領域でのマグネット適用が期待されている。

Y系超電導線材のマグネットへの適用のためには、導体の安定化技術、絶縁技術、巻線(コイル)化技術、冷却技術など総合的な検討が必要である。

3.2 小型ソレノイドマグネットの巻線

巻線時の機械的強度の確認、絶縁方法、巻線の固定方法を検討するため、小型のマグネットを作製して励磁試験を行い検証した。超電導線材は、導体のアスペクト比が大きいテープ状であるためエッジワイズ歪が懸念され、一般的にはパンケーキ型のマグネットが作製されることが多い。当社では、均一磁場分布が広く、巻線や励磁時の知見が電力機器の巻線により役に立つソレノイド型のコイル巻線の検討を当初から行ってきた。マグネットは層間にFRPのスペーサを挿入して各層の導体の冷却性を保っている。巻線時は、特に層が変わり立ち上がる部分で線材にエッジワイズ歪が加わらないように工夫して巻線する必要があることが、事前の検討で知見として得られている。

3.3 液体窒素冷却型マグネット

図10に液体窒素冷却型マグネットの概観写真、表4にマグネットの諸元を示す。図11に作製したマグネットを過冷却した液体窒素中(66 K)で励磁試験を行った時の通電電流値とホール素子で測定したマグネット中心磁界の関係を示す。マグネットの中心の最大磁界は通電電流値が120 Aで0.27 Tである。電圧は斜め45°の磁場が加わる6層目でおもに発生していることがわかった。これは、



図10 液体窒素浸漬型マグネットの概観
Fig. 10. View of solenoid magnet of dipping in liquid nitrogen type.

表4 液体窒素浸漬型マグネットの諸元
Table 4. Parameter of solenoid magnet.

巻線	内径	60 mm
	外径	107 mm
	高さ	133 mm
	ターン数	14
	層数	22
線材長		70 m

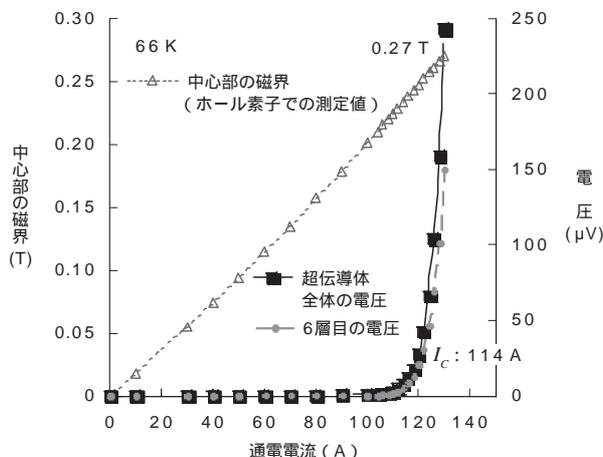


図11 通電電流値とマグネットの中心磁界(66 K)
Fig. 11. Relationship between operating current and central magnetic field.

Y系超電導線材は臨界電流値に磁場方向の依存性があり、45°の斜め磁界が加わる部分で線材の臨界電流値が最も小さいからである⁷⁾。

この励磁試験では100 A以上の励磁電流において電圧が観測され、通電電流の増大とともに発生電圧は増加している。これは線材の一部で臨界電流を超えたことによるものである。金属系超電導マグネットの場合には、このように臨界電流を超えることによって発生する電圧

により部分的に微少な発熱を生じる．この発熱は4 Kレベルでは線材等の比熱が小さく，常温での比熱に対しても3桁以上小さいため，微少発熱によっても線材温度が上昇する．そのため臨界電流の温度依存性により，さらに臨界電流が減少し発生電圧が大きくなり，それともなると温度上昇が増大する．このサイクルが短時間に起こるため最終的にマグネット全体が常電導に転移してしまう．そのため超電導状態から常電導状態に転移しないように，あるいは常電導転移したものがすぐさま超電導状態に復帰するようにする「安定性」を確保することが重要である．

一方，酸化物超電導材料では，臨界温度が高いことから液体窒素等による冷却により超電導状態に維持することが可能である．この温度領域では4 Kレベルと比較して先に述べたように比熱が大きく，発熱量が同じであってもそれによる温度上昇は微少である．

今回の励磁試験においても通電電流が100 Aを超えたところから電圧が観測されている．その通電電流で保持しても電圧値は変わらず，また線材の温度上昇も観測されなかった．このことは酸化物超電導マグネットの液体窒素温度領域での運転は安定して行われることを意味しており，酸化物超電導マグネットは構成を簡略できることを示唆している．

3.4 伝導冷却型マグネット

伝導冷却型マグネットは，冷凍機を用いて冷却するタイプのマグネットで，はじめにマグネットのフランジ部分を冷却し，スペーサと導体自身の熱伝導でマグネットを冷却することができるため，マグネットの励磁時の温度を自由に設定できる特長がある．フランジとスペーサには窒化アルミ (AlN) を用いて冷却性を高めてある．図12に伝導冷却型マグネットの概観写真，表5にマグネットの諸元を示す．さらにマグネットは金属系超電導 (LTS) の直流マグネットと組み合わせることで3 Tの磁界をマグネット外部から加えることができる．励磁試験は30 K，35 K，40 K，50 K，60 Kおよび77 Kで行った．各温度でマグネットは伝導冷却機の設定温度に到達し良好な冷却特性を示した．

図13に各温度におけるホール素子で得られたマグネットの中心部の磁界と通電電流値の関係を示す．LTSで加えた印加磁界に伝導冷却型マグネットへの通電によってロードライン (図中斜め右上がりのライン) に沿って中心磁界が発生する．発生磁界は0.27 T / 100 Aである．印加磁場なしの場合 (0 Tからの斜め右上がりのライン) 40 K以下で1 Tの発生磁界を得た．さらに35 Kでは400 Aで10分間通電を行い1.1 Tの発生磁界を発生させたが，通電中に電圧の発生や温度上昇は起こらなかった．印加磁場が3 Tのとき30 Kで300 Aの通電が可能で0.7 Tの磁界を発生し，印加磁場と合わせて3.7 Tであった．このように伝導冷却型マグネットは液体窒素冷却マグネットと同様に安定したマグネット励磁が可能であることがわかった⁸⁾．



図12 伝導冷却型マグネットの概観
Fig. 12. View of conduction cooling magnet.

表5 伝導冷却型マグネットの諸元
Table 5. Parameter of conduction cooling magnet.

巻線	内径	60 mm
	外径	110 mm
	高さ	114 mm
	ターン数	14
	層数	26
線材長		110 m

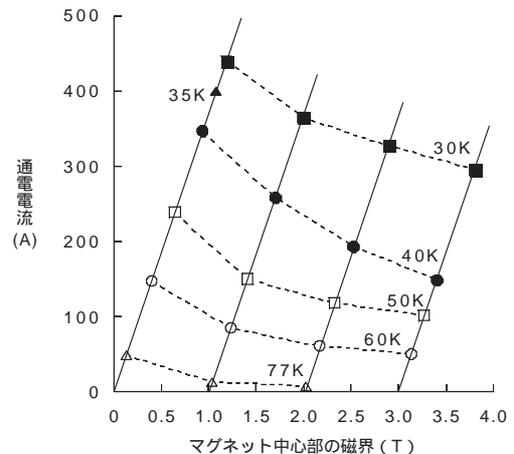


図13 マグネットの中心部の磁界と通電電流値の関係
Fig. 13. Relationship between current of coil and central magnetic field.

4. む す び

当社のY系超電導線材開発は，線材の特性においてはNEDOの中間目標値を達成し，開発目標値達成に向け順調に推移している．今後は線材の製造速度をあげるとともに，装置運用費用を下げることでさらなる低コスト化を図る必要がある．一方応用機器では，モータ，変圧器，限流器などの電力機器開発への線材提供および各機器の実証試験も始まり，超電導線材の適用が見通せる段階まで来たといえる．今回マグネット開発で得られた導体化

技術，巻線技術，冷却技術についての知見をこれらに適用するとともに，今後は機器開発に向け安定した線材提供を目標とする．

なお本研究は経済産業省の「超電導応用基盤技術研究開発(II)」として独立行政法人「新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)」からの受託により実施したものである．

参 考 文 献

- 1) 塩原 融：低温ジャーナル 2007，pp.32-35，2007
- 2) Y. Iijima, et al. : Appl. Phys. Lett. Vol.60, p.769, 1992
- 3) 飯島康弘ほか：第66回低温工学・超電導学会講演概要集，p.13，2002
- 4) 羽生 智ほか：第74回低温工学・超電導学会講演概要集，p.2，2006
- 5) 富士ほか：第76回低温工学・超電導学会講演概要集，p.23，2007
- 6) 佐藤謙一ほか：応用物理 171，pp.66-68，2002
- 7) 柿本ほか：第71回低温工学・超電導学会講演概要集，p.3，2004
- 8) 富士ほか：第75回低温工学・超電導学会講演概要集，p.190，2006