

Y系超電導線材の高性能化と応用

新規事業推進センター 飯島康裕¹

High-Performance Y-based superconducting wire and Applications

Y. Iijima

イットリウム系超電導線は単位断面積当たりの臨界電流密度が非常に高く、安価な液体窒素中でも高い超電導特性を示すため様々な超電導機器への応用が期待されています。当社では1991年に当社独自のIBAD法の開発に成功して以来、精力的にイットリウム系超電導線の開発を行い、過去20年間、イットリウム系超電導線開発で世界をリードしてきました。当社は2011年に臨界電流 (I_c) 572 A、長さ (L) 816.4 mの超電導線の製作に成功し、臨界電流 (I_c) と長さ (L) の積である $I_c \cdot L$ 値が 466,981 Amという世界記録を更新しました。ここでは、最近の線材の高性能化、長尺化への取り組み、また、応用に向けた取り組みについて概要を報告します。

Y-based superconducting wire is expected to be applied to various superconducting apparatus. They have high current density and show the high performance in liquid nitrogen, which is much cheaper than helium. In 1991, Fujikura succeeded in developing the key original technology to fabricate Y-based superconducting wire, which was called as ion beam assisted deposition (IBAD) method.

An 816.4 m long wire with end-to-end critical current (I_c) of 572 A/cm, corresponding to the world record $I_c \times L$ value of 466,981 Am/cm, was achieved at Fujikura. Today, we have established skills of routinely fabricating 500 m long wires with uniform I_c distribution over 500 A. In this report, we introduce recent improved performance of Y-based superconducting wire and developments of key technologies for their applications.

1. ま え が き

超電導とはある温度以下で物質の電気抵抗がゼロとなる現象です。1911年にオランダのオンネスによって超電導現象が発見されて以来さまざまな物質で確認され、1986年以降になると液体窒素中 (77 K = -196 °C) でも超電導特性を示す酸化物超電導体が発見されました。これら酸化物超電導体は従来の超電導体に比べて超電導を示す温度 (= 臨界温度) が飛躍的に高いため高温超電導体と呼ばれ、従来の超電導体は低温超電導体または金属超電導体と呼ばれています。

高温超電導体の中でもY (イットリウム) 系超電導体は磁場中でも高い性能を示し、広範囲に応用可能な高温超電導線材として期待され、日米を中心に精力的に線材開発が行われてきました。超電導は医療用MRI (Magnetic Resonance Imaging) や分析用NMR (Nuclear Magnetic Resonance) などに既に使用されていますが、電気抵抗が零の超電導線をケーブル化することによって長距離を損

失なく大電流送電することが可能で、また、コイル化することにより発熱なく小型で強い電磁石を実現でき、今後さらに高機能な応用機器に展開できることが期待されています。

Y系超電導は他の高温超電導と同時期に発見されながらもその線材化は長年困難であるとされてきました。それは超電導線材長手方向に亘って超電導の結晶を3次的に配向させる高度な技術開発が必要であったためです。

当社では早い時期からY系超電導材料による線材開発を開始しており、1991年には特定の角度からArイオンを照射させながらスパッタ蒸着することで無配向の金属テープ上に3次的に配向制御された薄膜を成膜するイオンビームアシスト蒸着 (Ion Beam Assisted Deposition : IBAD) 法を独自開発¹⁾しました。IBAD法の発明以来、精力的に線材開発に取り組み、ここ数年で数百m長において超電導に流すことが出来る電流 (= 臨界電流 (I_c)) 300 A以上の線材を製作できるに至り²⁾、2009年から市販を開始しています。本稿では当社における最近のY系超電導線材の開発動向と応用化に向けた取り組みについて概要を報告します。

1 超電導事業推進室グループ長 (工学博士)

略語・専門用語リスト		
略語・専門用語	正式表記	説明
臨界温度	Critical Temperature	超電導状態を維持できる上限の温度
Y系超電導線	イットリウム系超電導線	超電導層にイットリウム (Y) やカドリウム (Gd) など希土類系元素を含む酸化物超電導で、希土類系を総称してRE (Rare Earth) 系とも呼ぶ。他の高温超電導に比べて液体窒素付近の比較的温度的の高い領域で磁場中の臨界電流密度 (J_c) が高い特徴がある。
臨界電流, 臨界電流密度	Critical current, Critical current density	超電導状態で流しうる最大の電流値を臨界電流 (I_c) といい、電流値は温度、磁場に依存する。臨界電流 (I_c) を超電導体の断面積で除したものを臨界電流密度 (J_c) という。
IBAD法	イオンビームアシスト蒸着法 Ion Beam Assisted Deposition	イットリウム系線材を作製するキーとなる技術で、超電導特性を左右する結晶配向性を金属テープ上にて高度に制御する手法で、金属テープと超電導体の間の中間層の作製に適用される。日米欧で基本特許をフジクラが有しており、高特性のY系線材の多くにこのIBAD法が用いられている。
PLD法	レーザー蒸着法 Pulsed Laser Deposition	イットリウム系超電導層の作製に使われる方法で、エキシマレーザーを用いて紫外パルス光を真空中の超電導体に集光して超電導膜の蒸着を行う方法である。今回は図2に示すように、超電導薄膜を成長させる領域全体を電気炉のように断熱的に囲う「ホットウォール方式」を新たに開発して極めて安定した成膜条件を実現することに成功し、世界記録線材の開発につながった。

2. Y系超電導線材の実用化に向けた開発

2.1 Y系超電導線材の構造

当社のY系超電導線材の外観写真を図1に示します。厚さ75または100 μm の金属基板上にIBAD法により2軸配向中間層を複数積層し、Pulsed Laser Deposition (PLD) 法により超電導層を積層します。超電導層上にはAg保護層を成膜し、用途に応じた金属テープ (50~100 μm 厚) を安定化層としてラミネートして、最後に絶縁層としてポリイミドテープ (12.5 μm 厚) を2枚重ね巻きする構造となっています。このような構造の線材におけるトータルの厚さは150~300 μm です。また、現時点での標準品の液体窒素中 (77 K) における臨界電流 (I_c) は10 mm幅当たり400 A以上 (5 mm幅では200 A) です。

2.2 Y系超電導線材の長尺化と高特性化

Y系超電導線材の長尺化と高特性化において、IBAD法、PLD法といったセラミックス薄膜を形成するプロセスが技術的な鍵となります。IBAD法による2軸配向中間層の製作プロセスは、適切に選択した酸化物を使用した構造とすることで極めて薄い膜厚で高度に配向した結晶膜が得られることが知られています。当社では、さらに大型のイオン源を用いて成膜領域を大面積化することで高速で成膜できるようになり、1 km級の長尺線材においても高配向の中間層を製作できるに至っています³⁾。

一方、超電導層の成膜プロセスにはさまざまな手法が提案されていますが、当社ではPLD法を採用しています。PLD法は高エネルギーのパルスレーザーをターゲットと

ばれる原材料の焼結体に照射することで構成粒子を昇華させ、基材表面に堆積させる手法です。一般的にPLD法は成膜速度が速く、ターゲットの組成がそのまま薄膜に反映されるため組成制御が容易で、Y系超電導体のような多元系物質の高速成膜に適しています。しかし、PLD法により形成される超電導線材の特性は薄膜形成時の雰囲気温度に大きく影響されることが知られており、最適な温度から外れて成膜すると低特性で長手方向に不均一な I_c 分布を有する線材となってしまいます。そこで当社では、図2に示すように成膜領域をいわゆる電気炉のように高温の壁で囲ったホットウォール型PLD装置を独自に開発して、大面積領域で極めて安定した温度環境を再現可能としました。更に近年ではレーザー発振器自体の開発も著

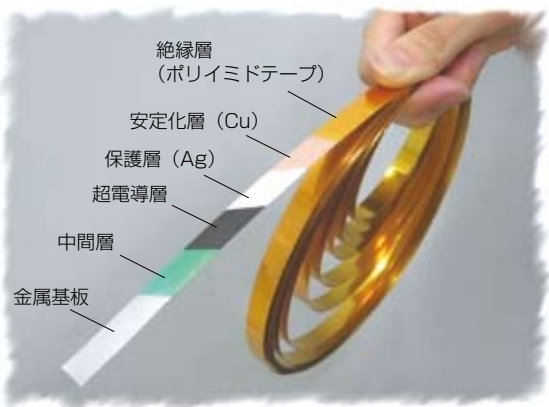


図1 Y系超電導線材外観
Fig. 1. Photograph of Y-based coated conductor.

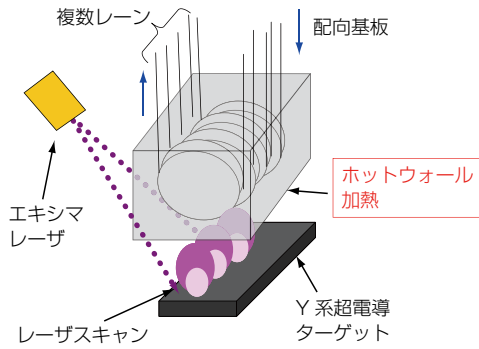


図2 ホットウォール型PLD装置の概念図
Fig. 2. Schematic of PLD system with hot-wall heating.

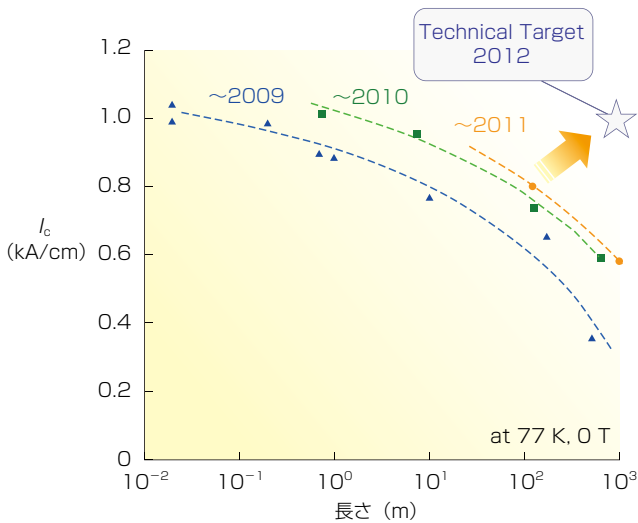


図3 Icと長さから見た2009-2011年の線材開発状況
Fig. 3. Progress of Ic from 2009 to 2011 at Fujikura.

しく、高出力のレーザーが得られるようになっており、ホットウォール型PLD法で 40 nm/sec.を超えるような高レートで成膜しても均質な超電導膜を形成できるに至っています⁴⁾。

当社における 2009～2011 年度にかけての線材開発進捗を図 3 に示しますが、Icと長さそれぞれにおいて大きな飛躍が見られます。特にIcに関して、世界的にも 10 mm 幅あたり 500 A以上の線材作製に苦勞する中で、110 m 長で 706 A以上の線材、更には 8 m長で 950 A以上かつ 70 cm長で 1003 Aという非常に高い特性の線材製作に成功しています。これはPLD法、特にホットウォール加熱型において厚膜でも比較的容易に高結晶性を実現できることが挙げられます。一方、実用線材では長い単長において高Icおよび長手方向に均一なIc特性が要求されますが、図 4 に示すように 2011 年には 816.4 m長において全長通電でIc=572 Aが得られ、線材開発の指標値であるIcと線材の長さLの積Ic×Lの値は 466,981 Amとなり 2010 年に当社が樹立した世界記録を更新しました。

上述のような開発により、市販用として定常的に製作する線材の特性も向上しています。図 5 には最近製造し

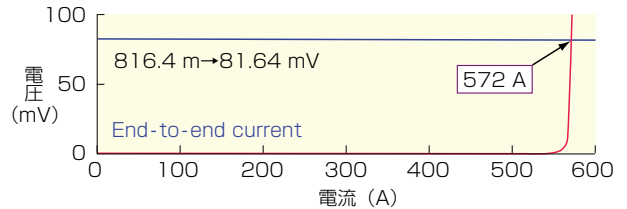
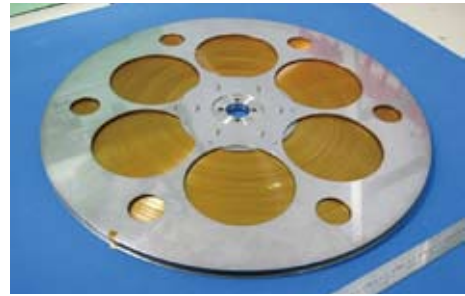


図4 800 m級線材の写真とI-V特性
Fig. 4. Photograph and I-V characteristic of an 800 m long wire.

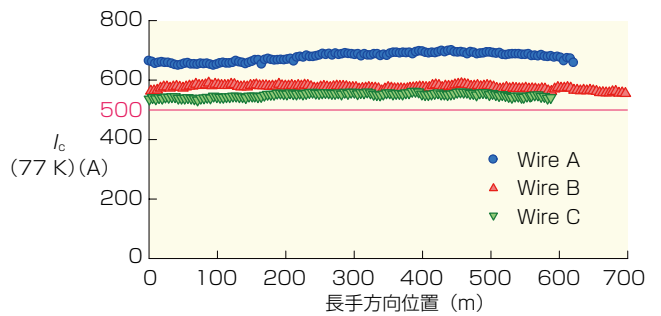


図5 市販用線材の長手方向のIc分布
Fig. 5. Longitudinal Ic distribution of product wires.

表 図5に示した線材の詳細値
Table. Detail data for wires shown in Fig. 5.

	Wire A	Wire B	Wire C
(1) 長さ (m)	621	700	587
(2) 平均 Ic (A)	649	575	550
(3) STDV (A)	14.7	11.0	6.9
(4) (3) / (2) × 100 (%)	2.2	1.9	1.3

た線材の長手方向のIc特性を示しますが、単長 500 m以上においてIc 500 A以上が得られており、長手方向にも非常に均一なIc分布であることが見て取れます。さらに表は図 5 で示した線材の詳細な値です。線材の均一性として長手方向Icの標準偏差を平均Icで除した値がいずれも 2 %前後です。このように当社においては線材開発で長尺化、高Ic化が進展しており、更なる高性能線材を市販できる体制が整ってきています。

3. Y系超電導線材の応用に向けた取り組み

当社では高特性なY系超電導線材開発と並行してマグネット応用に向けてコイル開発も行ってきました。2004年にはY系超電導線材 70 mを用いた浸漬冷却型ソレノ

イドコイルを試作し、2005年にはY系超電導線材 110 m を用いた伝導冷却型ソレノイドコイルを世界に先駆けて試作して、冷凍機伝導冷却下で世界初の中心磁場 1 T 以上の発生を確認しています⁵⁾。近年、Y系超電導線材を用いたコイル含浸においては、コイル構造や構成材料、コイル製作条件等を最適化しなければ冷却時に線材に加わる応力などによってY系超電導線材が局所的にダメージを受ける可能性があること、コイル化では低電圧領域までの電流-電圧特性で健全性を示すことが指摘されています⁶⁾。当社でも 5 mm 幅のY系超電導線材を約 200 m 用いた伝導冷却型パンケーキコイルの試作に成功しています⁷⁾。パンケーキコイルとはテープ状の線材をレコード状に巻いたコイルのことであり、個々のパンケーキコイルを接続する必要はありますが、比較的大型化に適している構造とされています。試作では 2 層のパンケーキコイルをエポキシ系樹脂で含浸し、含浸前後で液体窒素中の通電特性を比較してコイルの健全性を確認しています。さらに、上記のパンケーキコイルを 6 層積層することで図 6 のような 600 ターンの積層コイルを試作し、冷凍機による伝導冷却下で温度 50 K にて、166 A 通電時に比較的低い磁場ですが中心磁場 1.27 T を得ています。

また、超電導機器へ組み込まれる超電導コイルを想定する場合、伝導冷却下で安定して運転するには超電導コイルの電流-電圧特性を予測できることが望ましいです。当社では図 7 に示すようなY系超電導線材の磁場特性測定結果を用いて超電導コイルの電流 (I) - 電圧 (V) 特性、コイル内電圧分布計算値が実測値とよく一致することを確認しています⁷⁾。図 8 にコイル内電圧分布特性計算例と実測値比較例を示します。超電導コイルの電流-電圧特性を予測することで伝熱特性を含めたコイル設計への展開が可能と考えています。

Y系超電導線材を用いた応用機器の一つとして回転機が挙げられます。従来モータと比較した超電導モータの特徴は低速域で高トルクが得られ、小型化、高効率を期待できます。船舶用モータのほか、風力発電などへの応用も期待されています。Y系超電導線材を用いた超電導モータ開発例としては、2006 年に世界に先駆けて (財) 国際超電導産業技術研究センター超電導工学研究所、ジャパンモータアンドジェネレータ (株)、九州大学、当社にてY系超電導線材を固定界磁コイルに用いてY系超電導モータとしては当時、世界最高出力となる 15 kW 船舶用超電導モータの動作確認が行われました⁸⁾。

一方、超電導は直流送電の場合は電気抵抗が零ですが、交流送電の場合はわずかですが損失が発生します。Y系超電導線材の超電導層厚は数 μm と非常に薄いため平行磁場に対する磁化損失は非常に小さいですが、ケーブル化した場合、線材間のギャップで発生する垂直磁場に大きく支配されます。そのため線材幅を最適化する等、ケーブル断面の周方向の不均一に伴う垂直磁場を抑制することによる交流損失低減が検討されています⁹⁾。また、交流送電における交流損失は負荷率 (= 臨界電流に対する

運転電流) にも大きく依存する¹⁰⁾ ため、これまで述べてきたような臨界電流の向上により交流損失を大幅に低減できることも期待されています。

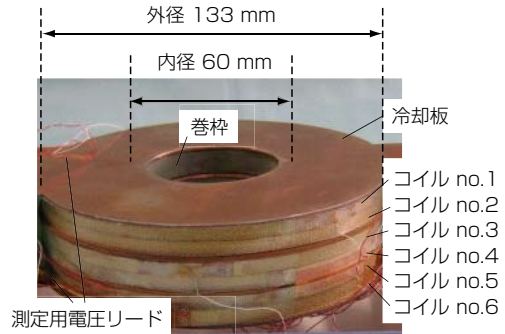


図 6 600 ターンパンケーキ型Y系超電導線コイル外観
Fig. 6. Photograph of stacked pancake coils (Total 600 turns).

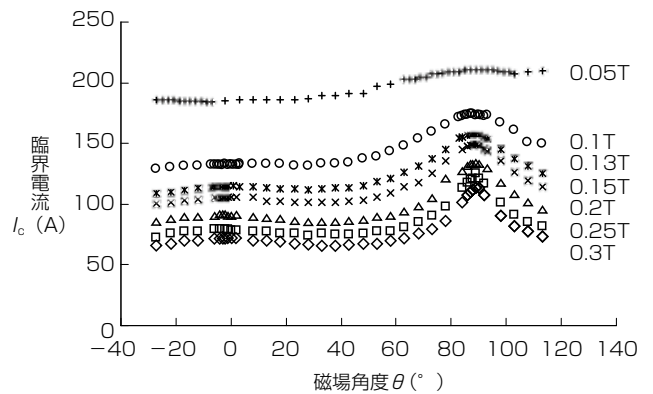


図 7 Y系超電導線の磁場角度依存特性例 (77 K) (5 mm 幅)
Fig. 7. I_c (A) - θ characteristics of Y-based coated conductors at 77 K (5 mmW).

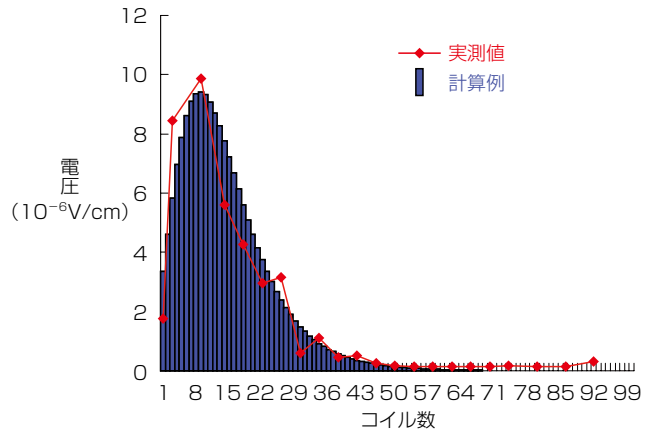


図 8 Y系超電導コイル半径方向の電圧分布特性例 (77 K)
Fig. 8. Voltage distributions of experimental coil at I_c defined with criterion of 10^{-6} V/cm at 77 K, s. f.

4. む す び

当社のY系超電導線材の最近の開発状況について述べました。当社では長年培ってきた中間層を形成するIBAD法、超電導層を形成するPLD法による生産性向上、高特化、長尺化を進め、臨界電流 I_c 572 A、長さ816.4 mの超電導線材の製作に成功し世界トップの技術力を誇っています。Y系超電導線材は高強度で、高磁場中でも優れた特性を示すことから、超電導ケーブル、超電導モータなどさまざまな機器への応用が期待されており、引き続き、Y系超電導線材の高特化、長尺化、低コスト化などを進めていきます。

さらに、コイル、ケーブル開発を含めた応用技術開発を通じて低炭素社会に貢献するインフラ分野への適用も積極的に展開していきたいと考えています。

謝辞

本研究は一部を除き経済産業省の「イットリウム系超電導電力機器技術開発」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」からの受託により実施されたものです。

参 考 文 献

- 1) Y. Iijima, et al. : "In-plane aligned $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ thin films deposited on polycrystalline metallic substrates," Applied Physics Letters, Vol. 60, No.6, pp. 769-771, 1992
- 2) 柿本ほか : 「IBAD/PLD法で作製するRE123長尺線材の品質向上」, 第84回 低温工学・超電導学会講演概要集, p. 185, 2011
- 3) S. Hanyu, et al. : "Fabrication of km-length IBAD-MgO substrates at a production rate of km h⁻¹," Superconductor Science and Technology, Vol. 23, p. 014017, 2010
- 4) K. Kakimoto, et al. : "High-speed deposition of high-quality RE123 films by a PLD system with hot-wall heating," Superconductor Science and Technology, Vol. 23, p. 014016, 2010
- 5) H. Fuji, et al. : "Development of Long Y-123 Conductor and Solenoid Magnet by IBAD/PLD Process," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 17, No. 2, pp. 3383-3385, 2007
- 6) H. Miyazaki, et al. : "Thermal Stability of Conduction-Cooled YBCO Pancake Coil," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 21, No. 3, pp. 2453-2457, 2011
- 7) M. Daibo, et al. : "Characteristics of Impregnated Pancake Coils Fabricated using REBCO Coated Conductors," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 22, No. 3, 3900204, 2012
- 8) M. Iwakuma, et al. : "Development of a 15 kW Motor with a Fixed YBCO Superconducting Field Winding," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 17, No. 2, pp. 1607-1610, 2007
- 9) 大熊 : 「イットリウム系超電導電力ケーブルの開発状況」, 低温工学, Vol.46, No.6 pp. 335-341, 2011
- 10) 雨宮 : 「高温超伝導体の交流損失」, 低温工学, Vol. 45, No.8, pp. 376-386, 2010