

# 800 m級高性能イットリウム系超電導線

新規事業推進センター 大保雅載<sup>1</sup>・柿本一臣<sup>2</sup>・菊竹亮<sup>1</sup>・鈴木龍次<sup>1</sup>  
飯島康裕<sup>3</sup>・伊藤雅彦<sup>4</sup>・斉藤隆<sup>5</sup>

## 800-m-long Y-based Coated Conductor with High Performance

M. Daibo, K. Kakimoto, R. Kikutake, R. Suzuki, Y. Iijima, M. Itoh, and T. Saitoh

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る。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ってきた。今回、臨界電流( $I_c$ ) 572 A、長さ( $L$ ) 816.4 mの超電導線の作製に成功し、臨界電流( $I_c$ )と長さ( $L$ )の積である $I_c \cdot L$ 値が466,981 Amとなり世界記録を更新した。また、線材の長尺化に伴い応用化に向けた取り組みについて概要を報告する。

Y-based coated conductors are expected to be adapted to the various superconducting applications. They have a high current density and show high performance in liquid nitrogen, which is as cheap as natural water. In 1991, Fujikura succeeded to develop the key technology to fabricate Y-based coated conductors, which is ion-beam-assisted deposition (IBAD) method.

In this study, we succeeded in over 800-m-long Y-based coated conductors with the uniform  $I_c$  572 A/cm-w. As a result, we set the new world record of  $I_c \times L$  value as 466,981 Am (= 572 A  $\times$  816.4 m).

### 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ある。1911年にオランダのオネスによって超電導現象が発見され、その後様々な物質で確認されて、1986年以降になると液体窒素中(77 K=-196℃)でも超電導特性を示す酸化物超電導体が発見された。図1に示すようにこれら酸化物超電導体は、従来の超電導体と比べて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る。

高温超電導体の中でもY(イットリウム)系超電導体は図2に示すように高磁場中で高い性能を有し、広範囲に應用が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いる。図2には超電導應用製品例が幾つか記載されているが、電気抵抗がゼロ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でき、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、これまでにない高機能な應用機器に展開できることが期待されている。

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た。それはY系超電導体の結晶構造は図3に示すとおりであり、超電導電流はCu-O<sub>2</sub>の面内(ab面)に集中するため線材作製のためには通電方向に結晶粒のab面をそろえる必要があり、また、ab面内でも結晶粒界でa, b各軸方向がそろっていないと通電特性が低下する<sup>1)</sup>ため、超電導線材長手方向にわたって超電導の結晶粒

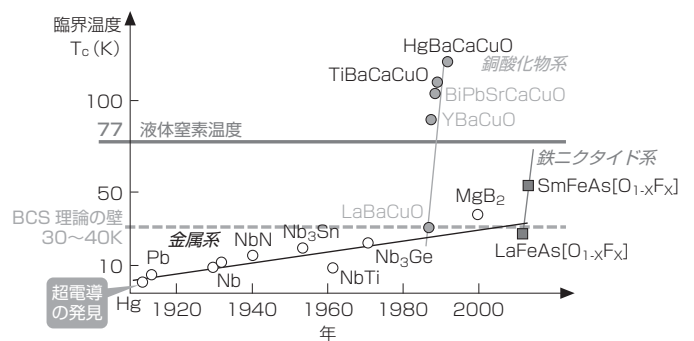


図1 主な超電導体の発見年と臨界温度  
Fig. 1. Critical temperatures ( $T_c$ ) vs. year data for selected superconductors.

1 超電導事業推進室  
2 超電導事業推進室主席研究員(博士(工学))  
3 超電導事業推進室グループ長(博士(工学))  
4 超電導事業推進室長  
5 副センター長

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湿度の高い領域で磁場中の臨界電流密度 (Jc) 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 (Ic) といい、電流値は温度、磁場に依存する。臨界電流 (Ic) を超電導体の断面積で除したものを臨界電流密度 (Jc) 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 10 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
n 値	n-value	超電導線材あるいは超電導コイルの電界 E (電圧 V) - 電流密度 J (電流 I) 特性において臨界電流を定義する電界基準 Ec (10 <sup>-4</sup> V/m がよく使われる) 付近の特性が E=Ec(J/Jc) <sup>n</sup> で表され、べき乗則として表現する方法がとられており、この指数を n 値と呼んでいる

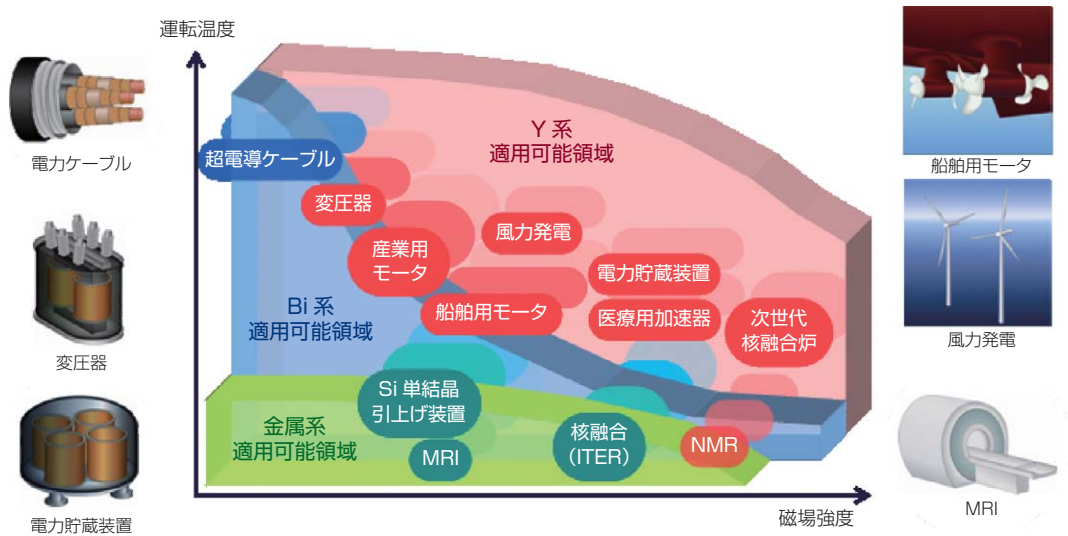


図 2 超電導応用製品例  
Fig. 2. Superconducting applications.

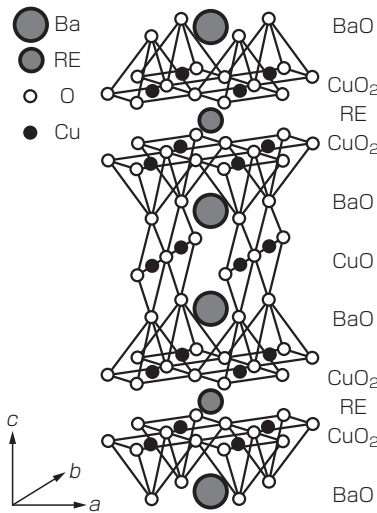


図3 Y系超電導体 ( $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ ) の結晶構造 (RE: 希土類)  
Fig. 3. Crystal structure of Y-based coated conductors.

を3次元的に配向させる高度な技術開発が必要であったためである。

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次元的に配向制御されたセラミックス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<sup>2)</sup>した。このIBAD法により3次元的に配向した中間層と呼ばれる層を作製し、その上にパルスレーザー蒸着 (Pulsed Laser Deposition: PLD) 法によって超電導層を積層させ、高い臨界電流特性を示す高性能な線材開発を行ってきた。

ここ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述べる。

## 2. 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4に示す。図4に示すように厚さ75~100 $\mu\text{m}$ の金属基板 (ハステロイ<sup>®</sup>) 上にIBAD法により2軸配向中間層を複数積層 (1 $\mu\text{m}$ 厚未満) し、PLD法により超電導層 (1~2 $\mu\text{m}$ 厚程度) を積層する。超電導層上にはAg保護層 (~10 $\mu\text{m}$ 厚) を成膜し、用途に応じた金属テープ (50~100 $\mu\text{m}$ 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 $\mu\text{m}$ 厚) を2枚重ね巻きする構造となっている。当社のY系超電導線材の製品ラインアップを表1に示すが、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300 A (77 K, self field) (5 mm幅は150 A (77 K, self field)) である。

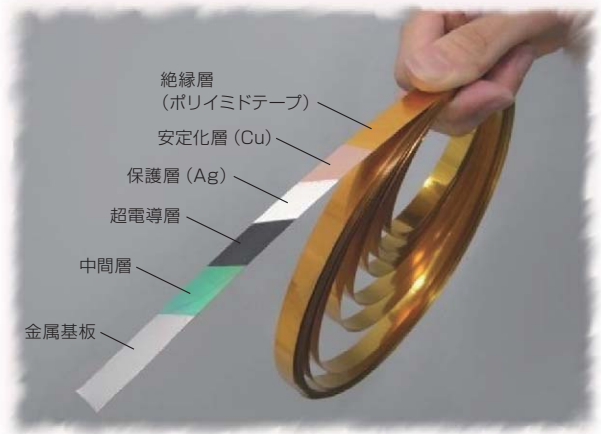


図4 Y系超電導線材外観  
Fig. 4. Photograph of Y-based coated conductors.

表1 Y系超電導線材の製品ラインアップ  
Table 1. Product lineup of Y-based coated conductors.

型番	幅 (mm)	厚さ ( $\mu\text{m}$ )		絶縁 (ポリイミド)	$I_c$ (A) (77 K, s.f.)
		金属基板	銅安定化層		
FYSC-S05	5	75, 100	-	○	> 150
FYSC-S10	10	75, 100	-	○	> 300
FYSC-SC05	5	75, 100	75, 100	○	> 150
FYSC-SC10	10	75, 100	75, 100	○	> 300

## 3. Y系超電導の実用化に向けた線材開発

### 3.1 Y系超電導線材の高特性化, 長尺化

Y系超電導線材は超電導層の薄膜を形成する際、結晶粒子の同一方位の結晶軸のなす角度が小さいほど臨界電流特性が良いことが知られている<sup>1)</sup>。当社が開発したIBAD法は、無配向の金属基板上に形成した2軸配向中間層を超電導層形成用の基板とすることで高い臨界電流特性を得られることが特徴である。図5にIBAD法の概念図を示し、図6にIBAD装置内部の概略図を示す。

IBAD装置内には、ターゲットにイオンを照射して薄膜の原料をスパッタするスパッタイオンガン、薄膜表面に対して特定の角度から薄膜に向けてイオンを照射するアシストイオンガンの2種類のイオンガンが装備されている。アシストイオン照射角度の最適化により、2軸配向中間層を得ることができる。装置内には送り出しリールと巻き取りリールが装備されており、一方のリールに巻かれた金属基板を図6に示した成膜装置を経由してもう一方のリールに巻き取ることで、長尺の線材製造が可能となっている。

当社ではY系超電導線材実用化に向け、MgOを2軸配向中間層として採用することにより2軸配向中間層の厚さを低減し、従来比100倍の成膜速度向上を実現した<sup>3)</sup>。IBAD法により形成された2軸配向中間層の配向の指標となるのはX線極点図測定の半値幅 $\Delta\phi$ である。図7はMgOを含む2軸配向中間層の半値幅



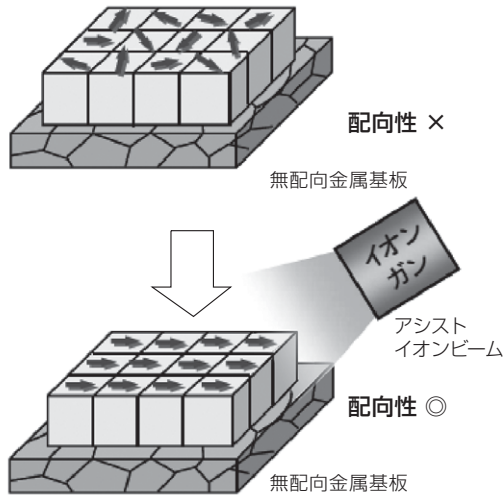


図5 IBAD法の概念図  
Fig. 5. Schematic of IBAD technique.

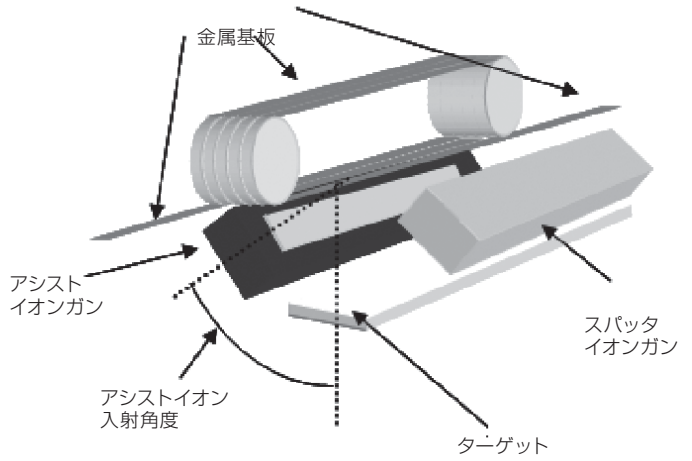


図6 大型IBAD装置内部の模式図  
Fig. 6. Schematic of large-scale IBAD system.

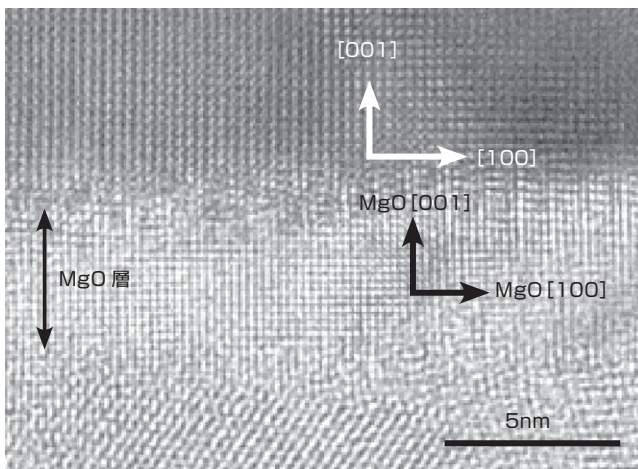


図7 MgOを含む2軸配向中間層の断面TEM写真  
Fig. 7. Cross-sectional TEM image of the IBAD buffer layer between cap layer and MgO interface.

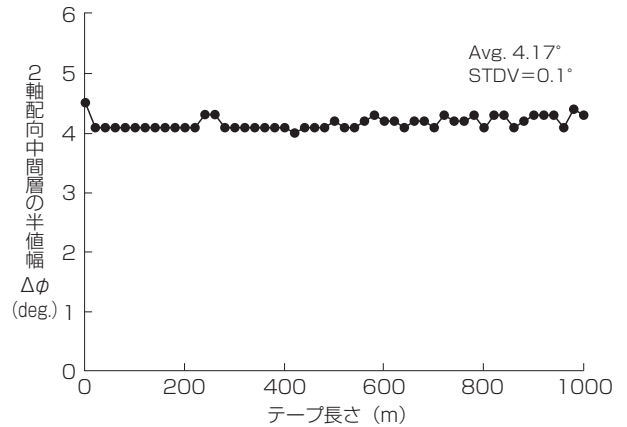


図8 MgOを含む2軸配向中間層の半値幅 $\Delta\phi$ の長手方向分布  
Fig. 8. In-plane texture of cap layer on 1 km IBAD-MgO substrate fabricated at 1 km/h.

$\Delta\phi$ が5°以下のキャップ層の断面TEM写真である。MgOを含む2軸配向中間層が連続的に形成されている様子が観察されている。また、図8にはMgOを含む2軸配向中間層の半値幅 $\Delta\phi$ の長手方向分布を示す。図8は20 m間隔でサンプリングした結果であるが、1000 m全長に亘ってMgOを含む2軸配向中間層の半値幅 $\Delta\phi$ が5°以下を実現していることが確認でき、1000 m級の長尺線材の基板として十分適用可能であることを示している。

一方、当社では超電導層はPLD法で形成している。PLD装置内部の概略図を図9に示す。PLD法はパルスレーザを超電導焼結体（超電導ターゲット）に照射して、超電導焼結体を昇華させ、線材表面に超電導層を積層させる。超電導層を形成する手法はPLD法以外にも幾つかあるが、PLD法は成膜速度が速く、成膜の自由度が高いことが特徴である。

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

いる<sup>4)</sup>。従来のPLD装置は超電導層成膜時に金属基板裏面と装置内熱板を接触させることにより金属基板を加熱している。金属基板とその上に形成された膜から伝わってきた熱により薄膜成長面が加熱されていたので、薄膜成長面の温度は膜厚に依存し膜厚が厚くなると臨界電流密度が低下する傾向があった。そこで、当社では従来のPLD装置の成膜時の加熱方法を改良することにより性能向上を実現している。基板加熱方法を改良したホットウォールPLD装置の概略図を図10に示す。この装置は超電導層を成膜する領域全体を加熱することにより、薄膜の成長面を常に一定温度に保つことが可能となる。図11にホットウォールPLDで製作した線材の $I_c$ の膜厚依存性を示す。図11のように従来のPLD装置では超電導層厚が厚くなるにつれて臨界電流密度が低下し臨界電流値の向上が困難であったが、ホットウォールPLDによって短尺サンプルではあるが、1 cm幅、超電導層厚さ6  $\mu\text{m}$ の線材で $I_c$  1040 A (77 K, self field)を実現した<sup>5)</sup>。また、図

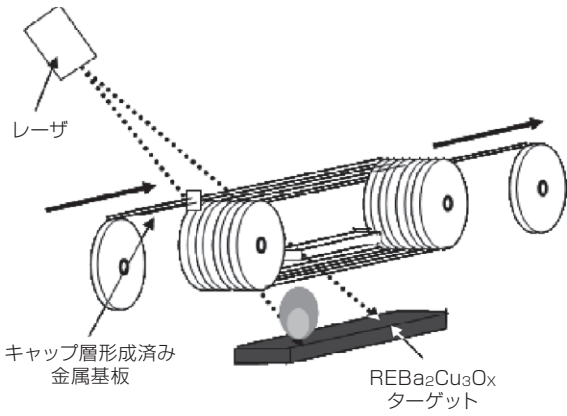


図 9 PLD 装置の概略図  
Fig. 9. Schematic of PLD system.

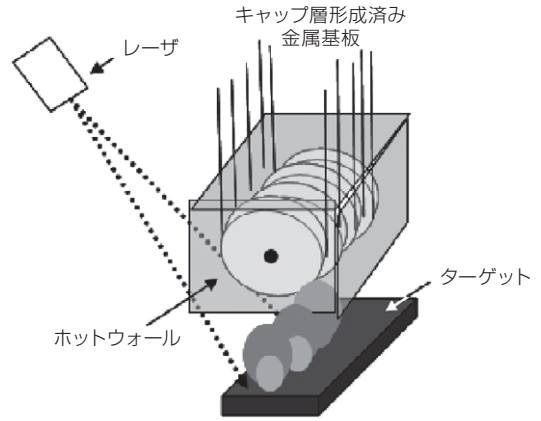


図 10 ホットウォール PLD 装置の概略図  
Fig. 10. Schematic of Hot-wall PLD system.

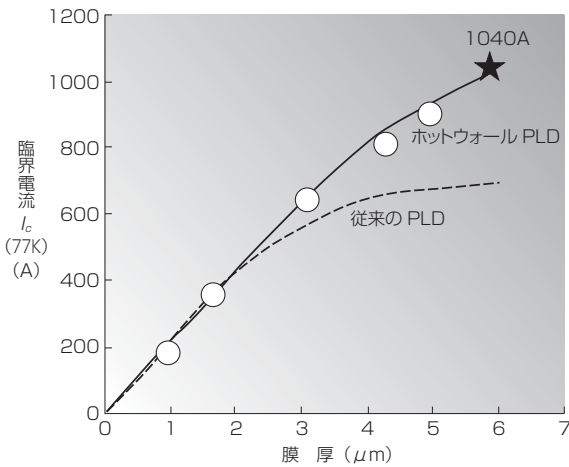


図 11 ホットウォール PLD 装置で製造された Y 系超電導線材の臨界電流 ( $I_c$ ) 膜厚依存性  
Fig. 11. Thickness dependence of  $I_c$  for short GdBCO samples fabricated by 2 types of PLD systems.

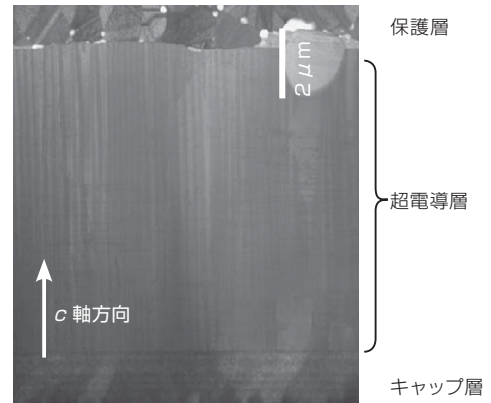


図 12  $I_c$  1040A (超電導層  $6\mu\text{m}$  厚) の断面 TEM 写真  
Fig. 12. The cross-sectional TEM image of  $6\mu\text{m}$  thick GdBCO sample with  $I_c$  of 1040 A.

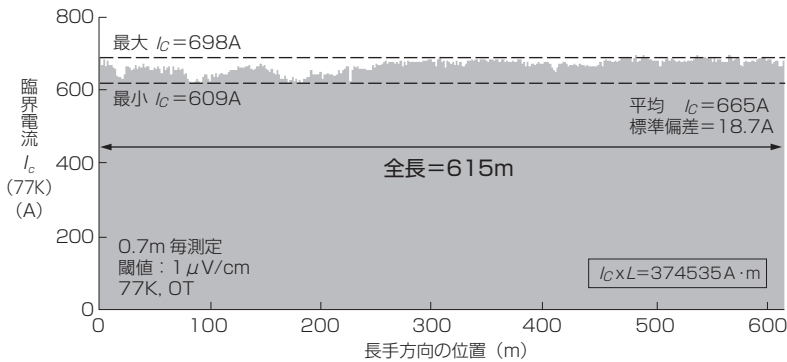


図 13 600m 級長尺線材における 長手方向の  $I_c$  分布 (通電法)  
Fig. 13.  $I_c$  distribution over 600 m-long Y-based coated conductor.

12 は  $I_c$  1040 A の断面 TEM 写真である。超電導層厚  $6\mu\text{m}$  と厚膜であるが、超電導層が厚さ方向に良好に形成されていることが確認できる。なお、短尺サンプルではあるが 77 K における臨界電流が 1 cm 幅当たり 1000 A を超える線材を実現できるのは世界でも当社のみである。

PLD 法の特徴として、成膜速度が速く、成膜の自由

度が高いことを前述したが、超電導層の生産性向上については基板に照射するパルスレーザーのパワーを増やすことにより、昇華する超電導焼結体の量を増加させ、単位時間当たりの成膜速度の向上を検討している。MgO を含む 2 軸配向中間層上にホットウォール PLD 装置によって超電導層を成膜し、600 m 級長尺線材の通電測定結果を図 13 に示す。図 13 は線材長手方向に

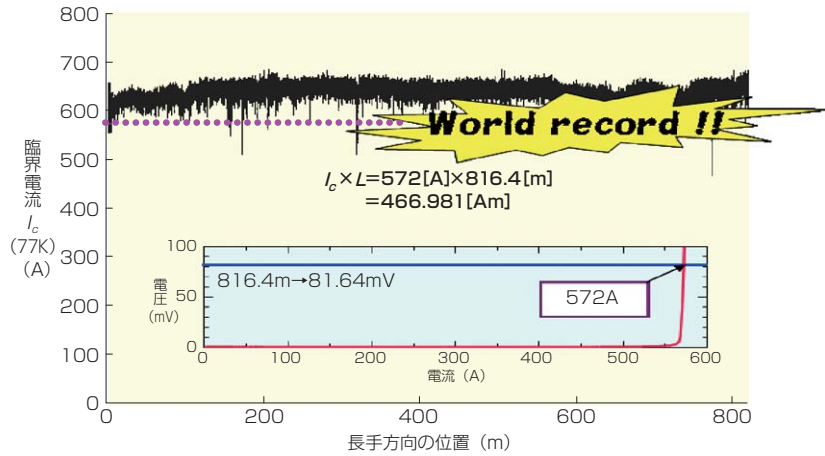


図 14 800m 長線材の磁化法および通電による  $I_c$  測定結果

Fig. 14. Longitudinal  $I_c$  distribution over 800 m-long Y-based coated conductor measured by magnetization-profiles and I-V curve for a 816 m long measured by end-to-end current conduction.

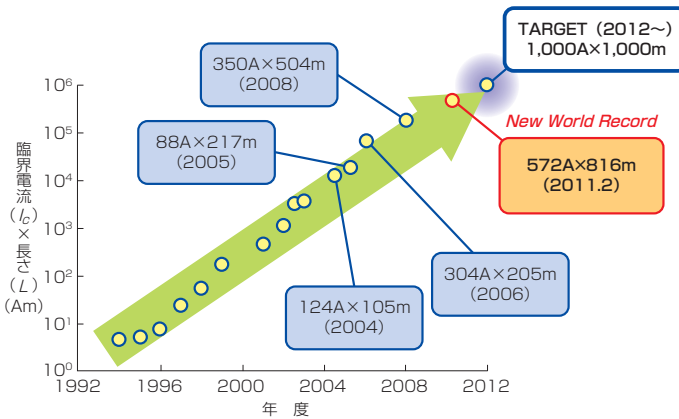


図 15 当社で作製された Y 系超電導線材の特性

Fig. 15. Progress of  $I_c \times L$  value of Y-based coated conductor in Fujikura.

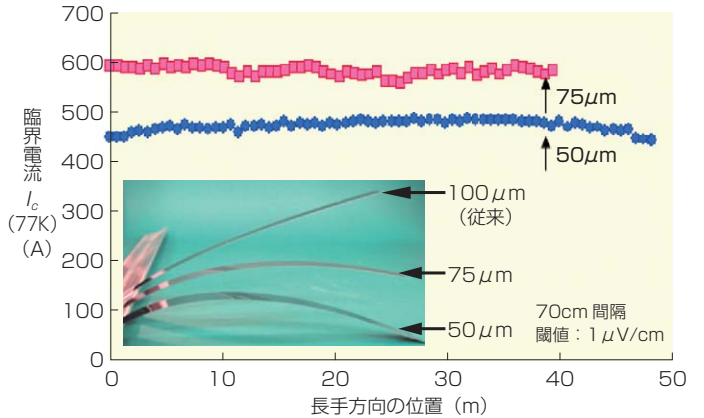


図 16 薄肉基板を使用した長尺線材の外観写真と長手方向の  $I_c$  分布 (通電法)

Fig. 16. Longitudinal  $I_c$  distribution of long Y-based coated conductor with thin Hastelloy tapes measured by current conduction.

70 cm 毎に通電測定シグラフにしたものであるが、線材長 615 m に亘って  $I_c$  600 A を超えた線材 (平均 665 A, 最大 698 A, 最小 609 A) が実現できており、長手方向の  $I_c$  標準偏差も 18.7 A と非常に均一な特性が得られている。この結果は、超電導線材の性能を表す  $I_c$  と線材長 ( $L$ ) の積 ( $I_c \cdot L$ ) で 374,535 Am を達成し、2010 年 11 月時点での世界記録となった。

さらなる長尺化として 800 m 級長尺線材の磁化法および通電による  $I_c$  測定結果を図 14 に示す。  $I_c$  572 A, 長さ 816.4 m の超電導線材の作製に成功し、  $I_c \cdot L$  で 466,981 Am を達成して 2011 年 2 月時点で世界記録を更新<sup>6)</sup>した。

図 15 には当社で作製されてきた Y 系超電導線材の開発進捗を示す。図 15 のように着々と長尺化、高  $I_c$  化を実現してきており、現在  $I_c$  1000 A, 長さ 1000 m の超電導線材を実現すべく開発を行っている。

### 3. 2 Y 系超電導線材の高電流密度化

当社では金属基板の薄肉化による高電流密度化につ

いても検討を行っている。超電導線材は前述のように図 4 に示すような積層構造をしているが、実際に電流が流れるのは超電導層である。用途に応じて金属基板や銅安定化層には必要最小限の厚さの超電導線材を適用することにより、コイル化した際にコイル電流密度 (= 通電電流  $\times$  ターン数 / コイル断面積) を高くすることで小型で高性能なコイルが実現できる。当社では従来 100  $\mu$ m 厚の金属基板を用いているが、薄肉化した 75 および 50  $\mu$ m 厚金属基板を使用した線材の長手方向の  $I_c$  分布を図 16 に示す<sup>6)</sup>。図 16 は線材長手方向に 70 cm 毎に通電して  $I_c$  を測定した結果であるが、40 ~ 50 m 長において  $I_c$  400 A 以上で均一な特性が得られている。75  $\mu$ m 厚については 2011 年度から製品ラインアップに加え、銅安定化層についてもユーザーの目的に応じて選択できるよう 50, 75, 100  $\mu$ m 厚の 3 種類を製品ラインアップとして揃えている。金属基板の薄肉化については引き続き検討を進めていき、今後、



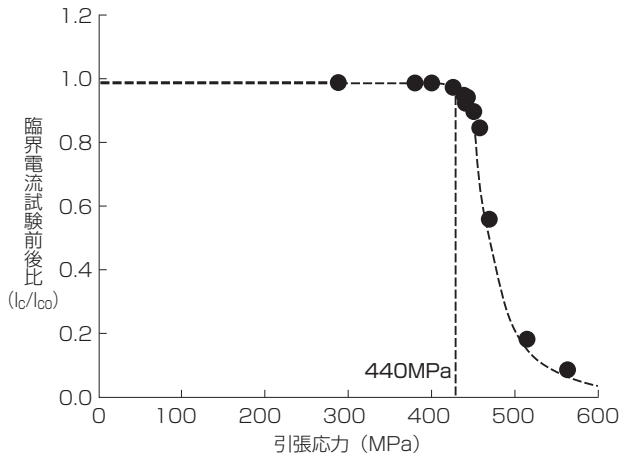


図 17 Y 系超電導線材の引張特性例

Fig. 17.  $I_c / I_{c0}$  vs. tensile strength of Y-based coated conductor.

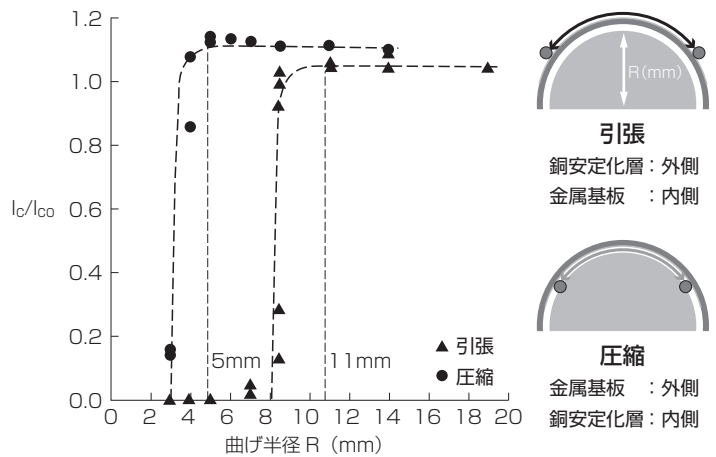
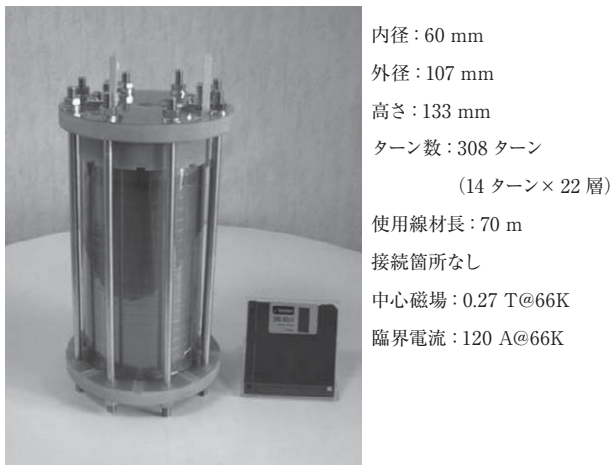


図 18 Y 系超電導線材の曲げ特性例

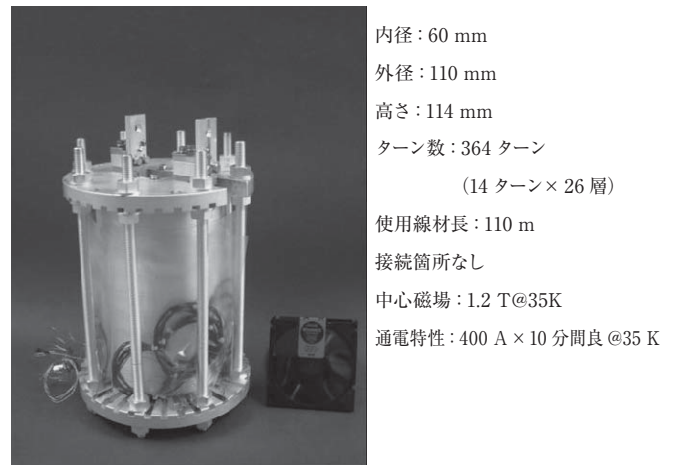
Fig. 18.  $I_c / I_{c0}$  vs. bending radius of Y-based coated conductor.



内径：60 mm  
 外径：107 mm  
 高さ：133 mm  
 ターン数：308 ターン  
 (14 ターン×22 層)  
 使用線材長：70 m  
 接続箇所なし  
 中心磁場：0.27 T@66K  
 臨界電流：120 A@66K

図 19 液体窒素浸漬冷却型 Y 系超電導コイル外観

Fig. 19. Photograph of solenoid coil of dipping in liquid nitrogen type.



内径：60 mm  
 外径：110 mm  
 高さ：114 mm  
 ターン数：364 ターン  
 (14 ターン×26 層)  
 使用線材長：110 m  
 接続箇所なし  
 中心磁場：1.2 T@35K  
 通電特性：400 A × 10 分間良 @35 K

図 20 伝導冷却型 Y 系超電導コイル外観

Fig. 20. Photograph of conduction cooling coil.

50  $\mu$ m 厚金属基板についても製品ラインアップに加えていく予定である。

### 3. 3 Y 系超電導線材の機械特性

ここで当社製 Y 系超電導線材の機械特性例について述べる。図 17 には金属基板 100  $\mu$ m，銅安定化層 100  $\mu$ m，5 mm 幅の Y 系超電導線材（型番：FYSC-SC05）の引張試験結果の一例を示す。図 17 は約 200 mm 長の試料を液体窒素中で臨界電流を測定（試験前臨界電流を  $I_{c0}$ ）し、その後、常温中で引張試験機によって所定の引張荷重を加え、引張荷重解放後、液体窒素中で臨界電流  $I_c$  を測定し  $I_c / I_{c0}$  を測定した結果である。440 MPa の引張荷重まで  $I_c / I_{c0} > 0.95$  であり、高い機械特性を有していることがわかる。また、図 18 には同じく 5 mm 幅の Y 系超電導線材（型番：FYSC-SC05）の曲げ試験結果の一例を示す。図 18 は約 150 mm 長の試料を液体窒素中で直線状態で臨界電流を測定（試験前臨界電流を  $I_{c0}$ ）し、その後、常温中で所

定の曲げ半径を有したガラスエポキシ製の治具に沿わせて曲げを加え、その状態で液体窒素中で臨界電流  $I_c$  を測定し  $I_c / I_{c0}$  を算出した結果である。曲げの方向は金属基板を内側にした状態（引張方向）、金属基板を外側にした状態（圧縮方向）の 2 通りで測定している。 $I_c / I_{c0} > 0.95$  を基準とすると、引張方向では曲げ半径 11 mm まで、圧縮方向では曲げ半径 5 mm まで曲げることができ、非常に小さい径まで加工可能ながわかる。曲げ特性については今後、薄肉の金属基板を適用することによって、さらに小さい径まで加工可能なが期待される。

## 4. Y 系超電導応用に向けた取り組み

### 4. 1 コイル開発

当社では高特性で長尺の Y 系超電導線材の開発に並行して Y 系超電導線材のマグネット応用に向けて積極的にコイル開発も行ってきた。2004 年には図 19 に示

表2 伝導冷却型パンケーキコイル適用線材  
Table 2. Specifications for stacked pancake coils.

型番	FYSC-SC05
$I_c$ @77K, s.f. (A) ( $10^{-6}$ V/cm 基準)	204 ~ 219
n 値 @77K, s.f. ( $10^{-7} \sim 10^{-6}$ V/cm)	32 ~ 37

表3 パンケーキコイル試作結果  
Table 3. Test results of single pancake coils.

コイル番号	1	2	3	4	5	6
コイル内径 (mm)	60	60	60	60	60	60
コイル外径 (mm)	132	131	132	132	132	133
ターン数	100	100	100	100	100	100
使用線材長 (m)	31	31	31	31	31	31
コイル $I_c$ @77 K (A) ( $10^{-6}$ V/cm 基準)	88	85	85	85	88	90
n 値 @77 K ( $10^{-8} \sim 10^{-7}$ V/cm)	30	31	33	35	35	33

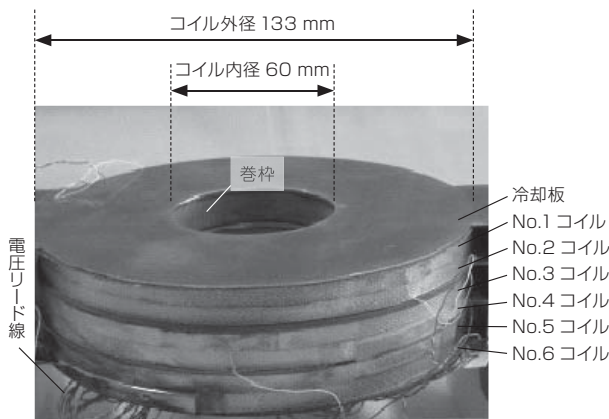


図22 600 ターン伝導冷却パンケーキ型積層コイル外観  
Fig. 22. Photograph of stacked pancake coils (6-layers) (Total 600 turns).

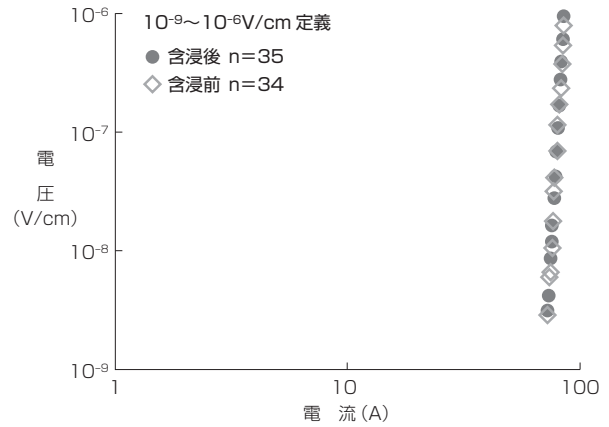


図21 含浸前後のパンケーキコイルの電界 E - 電流 I 特性  
Fig. 21. V - I characteristics of a pancake coil at 77K.

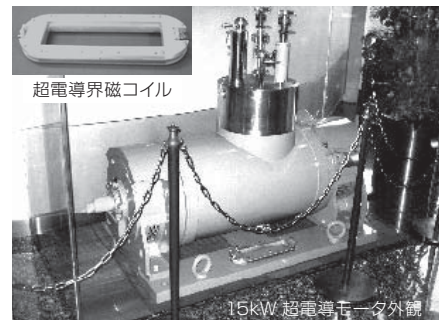


図23 Y系超電導界磁コイルと15kW超電導モータ外観  
Fig. 23. Photograph of field coil and 15kW ship propulsion motor of Y-based coated conductor.

すような 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世界に先駆けて試作し、過冷却した液体窒素中での良好な特性、コイル発生電圧の挙動を確認している<sup>7), 9)</sup>。また、2005 年には図 20 に示すような 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試作し、世界初の中心磁場 1T 以上の発生を確認している<sup>8), 9)</sup>。

近年、Y 系超電導線材を用いた含浸コイルにおいては、コイル構造やコイル製作条件、コイル構成材料を最適化しないと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が指摘され、コイル化において低電界の n 値をもって健全性を示すことが指摘されている<sup>10)</sup>。当社でも表 2 に示すような 5 mm 幅の Y 系超電導線材 (型番: FYSC-SC05) を約 190 m 用いて伝導冷却型パンケーキコイルの試作に成功している<sup>11)</sup>。試作ではパンケーキコイルを 2 個ずつ積層した状態で含浸し、液体窒素中で通電試験によってコイルの健全性を確認している。図 21 の含浸前後の電界 E - 電流 I 特性例のようにコイル n 値は  $10^{-9} \sim 10^{-6}$  V/cm の領域で特性が一致し、かつ、表 3 のように全てのコイルで n 値が 30 以

上であり健全なコイルが製作できていることを示している。また、表 3 の 6 個のパンケーキコイルを用いた図 22 のような 6 層コイルを試作し、GM 冷凍機による伝導冷却下で 50 K と比較的高い温度ではあるが中心磁場 1.27 T を得ている。

#### 4. 2 機器・ケーブルへの適用と今後の展開

Y 系超電導線材を用いて実用化に向けた機器開発については、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、当社にて当社製 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を行っている<sup>12)</sup>。さらに、水中推進用プロペラを組み合わせ世界初の小型船外機級超電導水中推進システム (2.45 馬力) として実用環境である水中での回転動作も確認している。図 23 には 15 kW 船舶用超電導モータおよび使用された超電導固定界磁コイルの外観を示す。

従来モータと比較した超電導モータの特徴としては低速域で高トルクが得られ、小型化、高効率を期待で



きるのが最大の特徴であるため、船舶用モータ、風力発電などへの応用が期待されている。

一方、超電導は直流送電の場合は電気抵抗がゼロではあるが、交流送電の場合はわずかだが損失が発生する。超電導ケーブルでの交流送電における交流損失は超電導層の厚さが磁束変動幅となり大きく影響してくる。Y系超電導線材の超電導層厚はBi系超電導線材の超電導層厚に比べて1/5～1/10程度と言われており、超電導ケーブルでの交流送電においてもY系超電導線材の適用が期待されている。

## 5. 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、高特性化、長尺化を進め、臨界電流 $I_c$  572 A、長さ816.4 mの超電導線材の作製に成功し、臨界電流と長さの積 $I_c \cdot L$ で466,981 Amを達成して世界記録を更新した。Y系超電導線材は高強度であり、高磁場中でも優れた特性を有していることから、さまざまな機器への応用が期待されており、引き続き、高特性化、長尺化、低コスト化、高電流密度化などを進めていく予定である。

なお、応用に向けた検討について、世界に先駆けてコイル試作などを行ってきており、コイル開発を含めた要素技術開発を通じて応用機器への展開に貢献できるよう開発を進めていきたい。

## 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) D. Dimos, et al. : "Superconducting transport properties of grain boundaries in  $YBa_2Cu_3O_7$  bicrystals", Phys. Rev. B., Vol.41, pp.4038, 1990
- 2) Y. Iijima, et al. : "In-plane aligned YBCO thin films deposited on polycrystalline metallic substrates", Appl. Phys. Lett. Vol 60, p.769, 1992
- 3) S. Hanyu, et al. : "GZO/MgO IBAD-buffer layers for coated conductors", Physica C. Vol. 468, pp.1591-1593. 2008
- 4) 五十嵐ほか：「RE123 薄膜超電導線材」, フジクラ技報 第115号, p.46, 2008
- 5) K. Kakimoto, et al. : "Increase of production rate of RE-123 film by PLD system with the hot-wall type heating", Physica C. Vol. 469, pp.1294-1297. 2009
- 6) 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
- 7) Y. Iijima, et al. : "Development of long Y-123 coated conductors for coil-applications by IBAD/PLD method", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 15, No. 2, pp.2590-2595, 2005
- 8) H. Fuji, et al. : "Development of Long Y-123 Conductor and Solenoid Magnet by IBAD/PLD Process", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 17, No. 2, pp.3383-3385, 2007
- 9) 富士ほか：「超電導マグネット」, フジクラ技報 第113号, p.43, 2008
- 10) H. Miyazaki, et al. : "Thermal Stability of Conduction-Cooled YBCO Pancake Coil", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 21, No. 3, pp.2453-2457, 2011
- 11) 大保ほか：「GdBCO超電導線材の小型パンケーキコイル通電特性」, 第84回 低温工学・超電導学会講演概要集, p.81, 2011
- 12) M. Iwakuma, et al. : "Development of a 15 kW Motor with a Fixed YBCO Superconducting Field Winding", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 17, No. 2, pp.1607-1610, 2007