IBAD/MPMT-PLD 法による高 I_c 長尺 GdBCO 線材の開発衣斐 顕^{†,*1}, 宮田 成紀^{*1}, 山田 穰^{*1}, 塩原 融^{*2}Development of High I_c and Long GdBCO Coated Conductors
using IBAD/MPMT-PLD MethodAkira IBI,^{†,*1} Seiki MIYATA,^{*1} Yutaka YAMADA,^{*1} Yuh SHIOHARA^{*2}

Synopsis: We have developed high critical current, I_c , and long GdBa₂Cu₃O_{7-x} (GdBCO) coated conductors using ion-beam assisted deposition (IBAD) / multi-plume and multi-turn pulsed laser deposition (MPMT-PLD) method. We have successfully fabricated 32 and 60.7 m long GdBCO coated conductors with high I_c of 205 and 183 A at 77 K and 0 T, respectively. Moreover, the I_c of the 32 m long GdBCO coated conductor exceeded 20 A at all angles for the applied magnetic field of 3 T. This I_c value at 3 T was 2.5 times higher than that of the 200 A class YBa₂Cu₃O_{7-x} (YBCO) coated conductor. The production rate of the GdBCO layer was 7.5 to 10 m/h, which is about 2.6 times faster than that for a YBCO layer using the MPMT-PLD method and 10 times faster than that for a YBCO layer using the conventional PLD, single-plume and single-turn PLD, method. In addition, the material yield of the GdBCO layers using the MPMT-PLD method was about 26 to 28%. The GdBCO coated conductors with a high I_c in the magnetic field at 77 K, and capable of being produced quickly and with a high material yield are promising for practical applications.

Keywords: IBAD, MPMT-PLD, GdBCO, high I_c

1. はじめに

「次世代高温超電導線材」と呼ばれる YBa₂Cu₃O_{7-x}(YBCO) に代表される RE-123 系(RE : rare earth, 希土酸化物)超電導線材は, ①磁場中での臨界電流(I_c), 臨界電流密度(J_c)が高く, また, ②Bi 系線材のような銀シースを不要とする構造であるため低コスト化が可能であり, さらに, ③線材の構造上後加工が容易なため, 超電導ケーブル, 変圧器, モータ, 超電導電力貯蔵装置(SMES)等の電力応用に対して低交流損失化が可能である等の観点から, 現在注目されている高温超電導線材である. RE123 系超電導線材の開発は, 長尺化・高特性化・

低コスト化・低交流損失化を中心に, 日・米・欧・韓・中などで現在盛んに行われている. 最近の YBCO 線材の長尺化, 高 I_c 化の進展は目覚ましく, 200~500 m かつ 200~300 A 級の YBCO 線材が安定して作製されるようになって来た. 例えば, 超電導工学研究所 名古屋高温超電導線材開発センター (SRL-ISTEC NCCC) は, イオンビームアシスト蒸着法 (Ion-beam assisted deposition : IBAD method)¹⁾とパルスレーザ蒸着法 (Pulsed laser deposition : PLD method)を用いた IBAD/PLD 法で, 212.6 m, 245 A の YBCO 線材を作製し^{2,3)}, また, 米国の SuperPower 社は, IBAD 法と有機金属化学気相蒸着法(Metal-Organic Chemical Vapor Deposition : MOCVD method)を用いた IBAD/MOCVD 法で 427 m, 191 A の YBCO 線材を作製している⁴⁾. 機器応用の目安とされている線材の特性値である長さ L と I_c の積 $I_c \times L$ 値は, IGC 社は 81,550 A·m, SRL-ISTEC NCCC は 52,087 A·m となり, これは現在の $I_c \times L$ 値の世界 1, 2 位である. しかしながら, 磁場中での YBCO 線材の I_c は, 将来の機器応用の観点からみると, まだ十分であるとは言えない. そのため, 人工ピン導入による磁場中での高 I_c 化の研究が現在盛んに行われており, YBCO 線材の磁場中の I_c も向上してきている⁵⁻⁸⁾.

Received November 13, 2006

^{*1} 超電導工学研究所 名古屋高温超電導線材開発センター
〒456-8587 愛知県名古屋市中区熱田区六野 2-4-1

SRL-ISTEC Nagoya Coated Conductor Center,
4-1, Mutsuno 2-chome, Atsuta-ku, Nagoya, Aichi 456-8587, Japan

^{*2} 超電導工学研究所 線材研究開発部

〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13

SRL-ISTEC Division of Superconducting Tapes & Wires,
10-13, Shinonome 1-chome, Koto-ku, Tokyo 135-0062, Japan

[†] E-mail: ibi@istec.or.jp

一方、同じ RE-123 系である $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (GdBCO) 線材は、磁場中での I_c が YBCO 線材よりも高いことが知られている。これは、臨界温度(T_c)が高いことや、PLD 法を用いて作製した場合、 c 軸相関ピンとなる欠陥が成膜時に自然に導入されることが原因の 1 つであると考えられている⁹⁾。このような磁場中で高 I_c ・高 J_c をもつ GdBCO 線材は、近い将来の機器応用に対して有望である。超電導コイル、モータ、変圧器等の機器応用の観点からでは、長尺化・高 I_c 化に加えて、磁場中での高特性化も必要不可欠な要素となっている。現在のところ、数 cm の試料を用いた GdBCO 線材特性の報告は数多くあるが、数十 m、数百 m 級の報告例は殆んど無い。そこで我々は、IBAD/マルチプルーム・マルチターン(multi-plume and multi-turn : MPMT)-PLD 法^{2, 3, 10)}を用いて、数十 m 級の長尺 GdBCO 線材を作製し、その特性を評価した。

2. 実験方法

非磁性で高強度の無配向金属基板 Hatelloy C-276 上に、IBAD 法を用いて $\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ (GZO) を 2 軸配向中間層として成膜し、その上に、超電導層と GZO 層の反応を抑え、さらに結晶面内配向度($\Delta\phi$)を向上させるために、PLD 法を用いて CeO_2 を第 2 中間層(キャップ層)として成膜した。IBAD-GZO 層の $\Delta\phi$ は約 $10\sim 14^\circ$ 、PLD- CeO_2 層の $\Delta\phi$ は約 $4\sim 5^\circ$ で、膜厚はそれぞれ $0.8\ \mu\text{m}$ 、 $0.4\ \mu\text{m}$ である。この PLD- CeO_2 / IBAD-GZO 基板¹¹⁻¹⁴⁾上に、MPMT-PLD 法で GdBCO 層を成膜した。MPMT-PLD 法とは、基板の長手方向に対して複数のプルームを発生させ、かつ基板を加熱ヒータの周りに巻き回すことで、成膜レートの向上・成膜領域の拡大を行い、PLD 法の欠点の 1 つである低成膜レートを改善させる方法である^{2, 3, 10)}。GdBCO 層の成膜温度は約 $800\sim 870^\circ\text{C}$ 、酸素分圧は 600 mTorr、レーザ(XeCl エキシマレーザ、波長 308 nm)の発振エネルギーは 500 mJ、レーザの繰り返し周波数は 160 Hz (4 プルーム、 $40\ \text{Hz}\times 4$)、基板速度は 30 m/h で 1 回の成膜を行い、多層成膜法¹⁵⁻¹⁸⁾を行うことで厚膜化した。1 回の成膜での GdBCO 層の膜厚は、約 $0.3\sim 0.5\ \mu\text{m}$ である。作製した GdBCO 線材の長さは 32 m と 60.7 m である。これらの線材の超電導特性を調べると共に、高特性化・高速化の観点から検討を行った。

GdBCO 膜の結晶面外配向度(out-of-plane texturing degree, $\Delta\omega$)・結晶面内配向度(in-plane texturing degree, $\Delta\phi$)は X 線回折装置及び X 線極点図測定から評価を行った。表面粗さ(R_a)は、原子間力顕微鏡(AFM)で表面観察する際に測定した。 I_c 測定は、GdBCO 膜表面にスパッタ法で Ag 層を約 $20\ \mu\text{m}$ 成膜した後、 O_2 雰囲気中でアニールを行い、 $1\ \mu\text{V}/\text{cm}$ の定義で、液体窒素中(77 K)で直流 4 端子法を用いて測定を行った。

3. 結果及び考察

Fig. 1 は、32 m 長 GdBCO 線材の長さ方向の I_c 分布の結果で、各 0.8 m 毎の I_c の値をプロットしたものである。32 m 長の end-to-end の I_c は 205 A であった。32 m に亘ってほぼ一様

な膜が形成されていることがわかる。しかしながら、2 箇所程 I_c が低下している部分が存在する。この原因は明らかではないが、GdBCO 層の最適成膜条件からのズレ、局所的な欠陥の存在、成膜後の単純なハンドリングミス等が考えられる。Fig. 2 は、60.7 m 長 GdBCO 線材の長さ方向の I_c 分布の結果である。Fig. 1 と同様に各 0.8 m 毎の I_c の値をプロットしたもので、end-to-end の I_c は 183 A であった。32 m 長 GdBCO 線材に比べると均一性は低下しているが、これは GdBCO 層成膜中の最適成膜条件からのズレが大きな原因であると考えられる。

Fig. 3 は、32 m 長 GdBCO 線材の各層成膜後、端から数 cm を切り出した後、 I_c と a 軸配向粒の割合 ($A_a(\%)=[I(200)/\{I(006)+I(200)\}]\times 100$)を評価したものである。32 m 長 GdBCO 線材、212.6 m 長 YBCO 線材及び短尺 GdBCO 試料の比較を示している。YBCO 線材の場合、膜厚が増加していくにつれて A_a も増加して行く。特に膜厚が $1\ \mu\text{m}$ 付近から A_a は 10 %以上に増加し始め、それに伴って I_c の上昇率も激減する。膜厚増加につれて設定温度を上昇させながら成膜する多層成膜法¹⁵⁻¹⁸⁾を行ってはいるが、本研究所の装置は、背面(ハステロイ側)からのみの加熱方式であるので、膜厚が増加するにつれて YBCO の表面温度が低下し、 a 軸配向粒が支配的になることで I_c の上昇率が低下していると考えられる。

Fig. 1 Longitudinal I_c distribution of a 32 m long GdBCO coated conductor at 77 K and a self-field for every 0.8 m.

Fig. 2 Longitudinal I_c distribution of a 60.7 m long GdBCO coated conductor at 77 K and a self-field for every 0.8 m.

Fig. 3 Thickness dependence of I_c at 77 K and in a self-field, and the amount of a -axis oriented grain (A_a) of 32 m long GdBCO and 212.6 m long YBCO coated conductors. I_c values of the 32 m long GdBCO coated conductor, GdBCO short sample, and 212.6 m long YBCO coated conductor are plotted as (●), (▲), and (○), respectively. A_a values of 32 m long GdBCO and 212.6 m long YBCO coated conductors are plotted as (◆) and (◇), respectively.

そのため、現在、線材全体を加熱出来るようなシステムも検討中である。他方、GdBCO 線材の A_a の膜厚増加に対する上昇率はわずかで、少なくとも 1.5 μm 程度までは数%程度あることがわかる。よって、 I_c の上昇率は、膜厚が 1 μm 以上になっても比較的線形的であり、短尺 GdBCO 試料の I_c 結果をみても、さらに厚膜化することで、300 A 以上の長尺 GdBCO 線材の作製は可能であると予想される。Fig. 4 は、長尺線材の GdBCO 層と YBCO 層の表面粗さ(R_a)の膜厚依存性を示したものである。YBCO 層の R_a は膜厚が増加するにつれて線形的に増加するが、GdBCO 層の R_a は、膜厚が増加してもほぼ一定である。超電導層の R_a が増加すると表面の放射率が増加するため表面温度が低下する。その結果、超電導層表面は a 軸配向粒が支配的となり、 I_c は低下する。このように R_a の観点から考察しても、GdBCO 線材は膜厚増加による高 I_c 化に適していることがわかる。

Fig. 5 は、3 T, 77 K の磁場中での GdBCO 線材と YBCO 線材の、 I_c の印加磁場角度依存性(I_c - θ 特性)を比較したものである。GdBCO 線材は、 θ が 0°(B// c -axis)でピークを持ち、また、全ての角度において YBCO 線材よりも高 I_c であることがわかる。PLD 法で作製された YBCO と GdBCO の断面を透過型電子顕微鏡(Transmission Electron Microscope : TEM)で観察すると、GdBCO は、YBCO と比較して膜内全体(膜厚方向にも)ランダムに積層欠陥が多数存在していることから、転移やこの積層欠陥が c 軸相関ピンとして機能していると考えられている⁹⁾。また、線材の T_c も、YBCO の約 88~89 K に対して、GdBCO は約 91~93 K と高いことも影響していると考えられる。

Table 1 は YBCO と GdBCO 層の製造速度を比較したものである。両者とも 200 A 級線材を対象としている。この表から、GdBCO 層の製造速度は YBCO 層に比べて 2~2.6 倍速く、従来の PLD 法と比較すると 10 倍程度向上していることが

Fig. 4 Thickness dependence of surface roughness (R_a) of 32 m long GdBCO and 212.6 m long YBCO coated conductors.

Fig. 5 Dependence on the magnetic field angle of I_c at 77 K and 3 T for 32 m long GdBCO and 212.6 m long YBCO coated conductors.

Table 1 Comparison of production rate of long GdBCO and YBCO layers using the MPMT-PLD method.

	Length (m)	I_c (A)	Production rate (m/h)
GdBCO	32	205	10
GdBCO	60.7	183	7.5
YBCO	212.6	245	3.75

Table 2 Comparison of material yield of long GdBCO and YBCO layers using the MPMT-PLD method.

	Length (m)	I_c (A)	Material yield (%)
GdBCO	32	205	26
GdBCO	60.7	183	28
YBCO	212.6	245	20.7

わかる。これは、YBCO と比較して、1 回の成膜で高 J_c 層が厚く成膜されることが原因であると考えられる。GdBCO 成膜中の酸素分圧は 600 mTorr であるため、GdBCO のプルームの形状は、YBCO 成膜時(酸素分圧 200 mTorr)と比較すると小さくなる。酸素分圧が高くなることで、プルームの内部密度が高くなることと、プルームの形状・サイズが、4 本の基板の位置内に十分入っているため、基板表面以外への粒子の拡散の影響が少ないという理由から、1 回の成膜で高 J_c 層が厚く成膜されることで製造速度の向上につながっていると考えられる。

Table 2 は、GdBCO と YBCO の収率を示したものである。MPMT-PLD 法を用いることで、従来の PLD 法を用いた場合の収率(約 2~5%)の 10 倍近い値を得ることが出来た。さらに、GdBCO と YBCO で比較してみると、1.3 倍程度 GdBCO の収率の方が高い。これは、例えば、気相成長の過程における YBCO と GdBCO の融点の違いによる蒸発量差等、両者の結晶成長の違いによる影響であると思われるが、詳細は今後の検討が必要である。

4. まとめ

我々は、IBAD/MPMT-PLD 法を用いて長尺 GdBCO 線材の開発を行った。32 m 長、60.7 m 長の GdBCO 線材を作製した結果、end-to-end の I_c は、それぞれ 205 A、183 A であった。また、磁場中 3 T、77 K での I_c は、線材に対する全ての角度で 20 A を超えており、同じ 200 A 級の YBCO 線材(8 A @ 3 T & 77 K)と比較すると、磁場中で高 I_c ・高 J_c を得ることが容易であることがわかる。GdBCO 層の製造速度は 7.5 m/h~10 m/h で、同じ 200 A 級の YBCO 線材の製造速度と比較して 2~2.6 倍となった。また、GdBCO の収率は 26~28% となり、従来の PLD 法の約 10 倍の収率を達成することが出来た。このように IBAD/MPMT-PLD 法を用いた GdBCO 線材は、高 I_c 化・高速化・高収率化に適しており、今後の REBCO 線材の機器応用に対して有望なプロセスになることが期待される。

本研究は、超電導応用基盤技術研究体の研究として、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託を受けて実施したものである。

長尺 GdBCO 層の成膜に関して御助力頂きました、滝 ゆかり氏、久米 達海氏、杉浦 允俊氏、石田 暁氏、中間層の成膜に関して御助力頂きました、栗木 礼二氏、林 悟氏をはじめとする超電導工学研究所 名古屋センターの皆様方に、心から御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) Y. Iijima, N. Tanabe, O. Kohno, Y. Ikeno: "In-plane aligned $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ thin films deposited on polycrystalline metallic substrates," Appl. Phys. Lett. **60** (1992) 769
- 2) A. Ibi, H. Fukushima, R. Kuriki, S. Miyata, K. Takahashi, H.

- Kobayashi, M. Konishi, T. Watanabe, Y. Yamada, Y. Shiohara: "Development of long YBCO coated conductors by IBAD-PLD method," Physica C **445-448** (2006) 525
- 3) A. Ibi, Y. Yamada, H. Fukushima, R. Kuriki, S. Miyata, T. Watanabe, Y. Shiohara: "High I_c and Long YBCO Coated Conductor using Multi-plume and Multi-turn PLD Method," TEION KOGAKU **40** (2005) 585-590 (in Japanese)
- 衣斐 顕ら: 「マルチプルーム・マルチターン PLD 法による高 I_c YBCO 長尺線材」, 低温工学 **40** (2005) 585-590
- 4) V. Selvamanickam, Y. Chen, X. Xiong, X. Zhang, Y. Xie, Y. Oiao, J. Reeves, R. Schmidt, A. Rar, K. Lenseth, D. Hazelton: "Progress in scale up of second-generation HTS conductors" presented at 2006 International Symposium on Superconductivity, Nagoya, Japan (2006) program No. WT-20-INV
- 5) K. Matsumoto, T. Horide, P. Mele, Y. Yoshida, M. Mukaida, A. Ichinose, S. Horii: "Effects of artificial pinning centers on vortex pinning in high-temperature superconducting films" Physica C, **426-431** (2005) 1091
- 6) A. Goyal, S. Kang, K J Leonard, P M Martin, A A Gapud, M Varela, M Paranthaman, A O Ijaduola, E D Specht, J R Thompson, D K Christen, S J Pennycook, F A List: "Irradiation-free, columnar defects comprised of self assembled nanodots and nanorods resulting in strongly enhanced flux-pinning in $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ films," Supercond. Sci. Technol. **18** (2005) 1533
- 7) H. Kobayashi, S. Ishida, K. Takahashi, M. Konishi, A. Ibi, S. Miyata, Y. Yamada, Y. Shiohara, T. Kato, T. Hirayama: "Investigation of magnetic properties of YBCO film with artificial pinning centers on PLD/IBAD metal substrate," Physica C **445-448** (2006) 625
- 8) Y. Yamada, K. Takahashi, H. Kobayashi, M. Konishi, T. Watanabe, A. Ibi, T. Muroga, S. Miyata: "Epitaxial nanostructure and defects effective for pinning in $Y(RE)Ba_2Cu_3O_{7-x}$ coated conductor," Appl. Phys. Lett. **87** (2005) 132502
- 9) K. Takahashi, Y. Yamada, M. Konishi, T. Watanabe, A. Ibi, T. Muroga, S. Miyata, Y. Shiohara, T. Kato, T. Hirayama: "Magnetic field dependence of J_c for Gd-123 coated conductor on PLD-CeO₂ capped IBAD-GZO substrate tapes," Supercond. Sci. Technol. **18** (2005) 1118
- 10) T. Watanabe, R. Kuriki, H. Iwai, S. Miyata, T. Muroga, A. Ibi, Y. Yamada, Y. Shiohara: "Deposition of YBCO Film Using Multi-plume and Multi-turn PLD," TEION KOGAKU **39** (2004) 553-559 (in Japanese)
- 渡部智則ら: 「YBCO のマルチ-プルーム・マルチ-ターン PLD 成膜」, 低温工学 **39** (2004) 553-559
- 11) S. Miyata, T. Muroga, H. Iwai, A. Ibi, T. Watanabe, Y. Yamada, Y. Shiohara, T. Kato, T. Hirayama: "Long and High Rate Production of IBAD Templates for YBCO Coated Conductors," IEEE Trans. Appl. Supercond. **15** (2005) 2671
- 12) S. Miyata, T. Muroga, H. Iwai, A. Ibi, T. Watanabe, Y. Yamada, Y. Shiohara: "Fabrication of Biaxially-textured Long Template Tapes for $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ Superconducting Wires Using the IBAD Method," TEION KOGAKU **39** (2004) 572-577 (in Japanese)
- 宮田成紀ら: 「IBAD 法による $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ 高温超電導線材用二軸配向長尺基板の作製」, 低温工学 **39** (2004) 572-577
- 13) T. Muroga, T. Araki, T. Niwa, Y. Iijima, T. Saito, I. Hirabayashi, Y. Yamada, Y. Shiohara: "CeO₂ Buffer Layers Deposited by Pulsed Laser Deposition for TFA-MOD $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ Superconducting Tape," IEEE Trans. Appl. Supercond. **13** (2003) 2532

- 14) Y. Yamada, T. Muroga, H. Iwai, T. Izumi, Y. Shiohara: "Present status and perspective of IBAD and PLD system in SRL and self epitaxy in PLD CeO₂ on IBAD seed layer," *Physica C* **392-396** (2003) 777
- 15) H. Iwai, T. Muroga, T. Watanabe, S. Miyata, A. Ibi, Y. Yamada, Y. Shiohara, T. Kato, T. Hirayama: "Fabrication of High J_c YBa₂Cu₃O_{7-x} Coated Conductors Prepared by Pulsed Laser Deposition on *Self-Epitaxial* CeO₂ Buffers," *J. Japan Inst. Metals* **68** (2004) 718-722
岩井博幸ら: 「PLD-IBAD 法 YBCO 超電導線材の開発 自己配向成長した CeO₂ 膜を利用した YBa₂Cu₃O_{7-x} 超電導線材の開発」, 日本金属学会誌 **68** (2004) 718-722
- 16) A. Ibi, H. Iwai, K. Takahashi, T. Muroga, S. Miyata, T. Watanabe, Y. Yamada, Y. Shiohara: "Investigation of thick YBCO coated conductor with high critical current using IBAD-PLD method" *Physica C*, **426-431** (2005) 910
- 17) A. Ibi, H. Iwai, T. Muroga, S. Miyata, T. Watanabe, Y. Yamada, Y. Shiohara: "Preparation of Thick YBCO Coated Conductor with High Ic Using IBAD-PLD Method," *TEION KOGAKU* **39** (2004) 567-571 (in Japanese)
衣斐 顕ら: 「IBAD-PLD 法を用いた厚膜 YBCO 線材の高 Ic 化の検討」, 低温工学 **39** (2004) 567-571
- 18) S. Sievers, F. Mattheis, H. U. Krebs, H. C. Freyhardt: "Grain orientation in thick laser-deposited Y₁Ba₂Cu₃O_{7-δ} films : Adjustment of c-axis orientation," *J. Appl. Phys.* **78** (1995) 5546

衣 斐 顕 1970 年 8 月生, 1997 年山梨大学工学部卒業. 2003 年山梨大学大学院工学研究科博士後期課程修了. 2003 年 (財) 国際超電導産業技術研究センター超電導工学研究所研究員. 主に高温超電導線材の開発研究に従事. 低温工学協会, 応用物理学会会員. 工学博士.

宮 田 成 紀 1970 年 12 月 7 日生, 1994 年京都大学工学部冶金学科卒業. 2001 年同大学大学院工学研究科博士後期課程 (材料工学専攻) 修了, 同年京都大学大学院工学研究科非常勤講師, 超電導体の混合状態の研究を行う. 2002 年 (財) 国際超電導産業技術研究センター超電導工学研究所に勤務, 高温超電導線材の開発に従事. 低温工学協会, 日本物理学会, 応用物理学会会員. 工学博士.

山 田 穰 1956 年 1 月生, 1981 年 3 月東京大学大学院金属工学科修士課程修了. 同年 4 月 (株) 東芝入社, 研究開発センターにて超電導材料, 線材開発に従事. 1989 年 10 月ドイツカールスルーヘ国研にて客員研究員. 2000 年 4 月 (財) 国際超電導産業技術研究センター超電導工学研究所名古屋研へ出向. 2003 年 4 月名古屋研から, 名古屋高温超電導線材開発センターに改称. 一貫して, 超電導材料, 線材開発研究に従事. 低温工学協会, 応用物理学会, 米国材料学会など会員. 工学博士.

塩 原 融 1949 年 4 月生, 1979 年 2 月早稲田大学大学院理工学研究科博士課程修了 (工学博士号取得), 早稲田大学鋳物研究所特別研究員として研究を継続, 1980 年 9 月マサチューセッツ工科大学 Materials Processing Center 客員研究員, 1983 年 9 月より同大学研究助教授を務め, 1988 年 9 月国際超電導産業技術研究センター超電導工学研究所第 4 研究部長, 2002 年 7 月同研究所線材研究部門統括, 第 4・第 5 研究部長, 2003 年 4 月線材研究開発部長就任. 主として超電導線材作製プロセスの研究に従事. その間, 東大, 阪大, 名古屋大, 東工大, 早大において非常勤講師, 米国材料学会 MRS の Principal Editor, Advisory Review Board Member 歴任. 現在 ASC (Applied Superconductivity Conference) Board Member, 日本金属学会編集委員, 日本学術振興会第 19 委員会及び第 161 委員会委員として活動.