

高磁場マグネット用 Nb<sub>3</sub>Sn 超電導線材の開発

宮崎 隆好<sup>†</sup>, 宮武 孝之, 加藤 弘之, 財津 享司,  
濱田 衛, 村上 幸伸\*, 長谷 隆司\*

Development of Nb<sub>3</sub>Sn Superconducting Wires for High-field Magnets

Takayoshi MIYAZAKI, Takayuki MIYATAKE, Hiroyuki KATO, Kyoji ZAITSU,  
Mamoru HAMADA, Yukinobu MURAKAMI\* and Takashi HASE\*

**Synopsis:** Research and development activities and some recent results related to Nb<sub>3</sub>Sn superconducting wires produced by Kobe Steel, Ltd. and Japan Superconductor Technology Inc. (JASTEC) are introduced. An outline of the activities is described from a historical point of view. Improvements in the characteristics (i.e., critical current density ( $J_c$ ), n-value and mechanical properties) of bronze-processed Nb<sub>3</sub>Sn wires are reviewed. Finally, the status of development for the Ta-Sn powder-in-tube (TS-PIT) process newly proposed by Tachikawa is described.

**Keywords:** Nb<sub>3</sub>Sn superconductor, bronze process, TS-PIT process, critical current density, n-value

## 1. はじめに

本年はNb<sub>3</sub>Snが発見されて50年目に当たる<sup>1)</sup>。現在、Nb<sub>3</sub>Sn線材はNbTi線材とともに量産レベルで工業化されており、NMR分析用マグネット、国際熱核融合実験炉(ITER)など核融合マグネット、また次世代高磁場加速器用マグネットなどへの適用または適用の検討が行われている。これら応用分野の中でNMRマグネットは、唯一Nb<sub>3</sub>Sn線材が量産商業ベースで利用されている分野である。神戸製鋼所グループでは超電導の応用分野として、早くからこのNMRマグネット市場への絞込みを行い、そこで適用可能なNb<sub>3</sub>Sn線材の開発に注力してきた。

本報では、まず(株)神戸製鋼所および超電導専門の関連会社 ジャパンスーパーコンダクタテクノロジー(株)(JASTEC)におけるNb<sub>3</sub>Sn線材開発の経緯の概略を紹介する。次に、ブロンズ法によるNb<sub>3</sub>Sn線材に関する開発成果のうち、代表的なものについて述べる。さらに、最近取り組んでいるTa-Sn粉末を用いたNb<sub>3</sub>Sn線材の実用化に関する成果を述べる。

2. 神戸製鋼所におけるNb<sub>3</sub>Sn線材開発

神戸製鋼所において超電導に関する開発が始まったのは1964年である<sup>2)</sup>。その後、1969年頃からA15型化合物超電導体の研究開発に取り組み<sup>3)</sup>、1970年代にはV系とならんでNb<sub>3</sub>Sn超電導線材の開発をスタートした。その後、開発の重心をNb<sub>3</sub>Snに移し、Ti添加ブロンズ法による多芯線材の開発を続けている<sup>4)</sup>。

1983年頃から、ブロンズ法と並行して九州大学との共同研究によりNb-Cu粉末法線材の開発にも取り組んだ<sup>5)</sup>。この延長として、1988年より新エネルギー・産業技術統合研究開発機構(NEDO)からの委託を受けた超電導発電関連機器・材料技術研究組合(Super-GM)に参画し、交流用Nb-Cu粉末法Nb<sub>3</sub>Sn線材の開発にあたった<sup>6,7)</sup>。

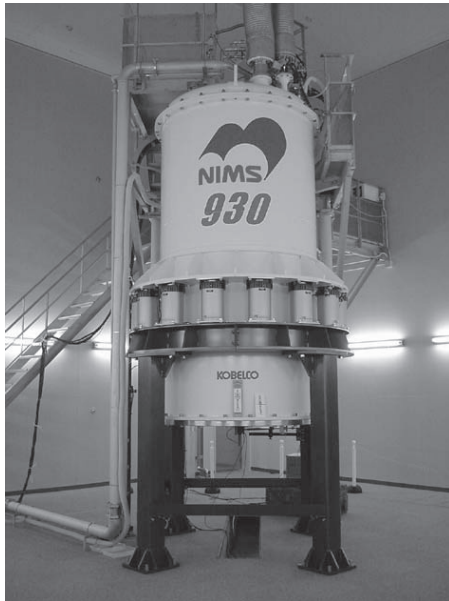
一方、事業面では1989年、超電導マグネット専門メーカーのジャパンマグネットテクノロジー(JMT)を創設した。その頃から、事業分野として主にNMRマグネットへの絞込みを行い、製造ノウハウ、量産技術の蓄積、外販拡大に努めてきた。1992年には500、600 MHz用Nb<sub>3</sub>Sn線材の製造技術を確立し、その後、NMRマグネットの高磁場化へのニーズとともに、線材開発も高磁場で高臨界電流密度( $J_c$ )、高n値を実現することを目標に進めてきた<sup>8-10)</sup>。その成果として、1993年に750 MHz、1998年には800 MHzマグネットを世界に先駆けて開発した<sup>11)</sup>。また、1995年から物質・材料研究機構(NIMS、当時金属材料技術研究所、NRIM)の1 GHzマグネット開発プロジェクトに参画し、20 Tを超える高磁場領域での $J_c$ の向上や機械的特性を改善した線材を開発し

Received July 5, 2004

(株)神戸製鋼所技術開発本部電子技術研究所  
〒651-2271 兵庫県神戸市西区高塚台 1-5-5  
Kobe Steel, LTD, 5-5 Takatsukadai 1-chome, Nishi-ku, Kobe,  
Hyogo, 651-2271 Japan

\* ジャパンスーパーコンダクタテクノロジー(株)(JASTEC)  
〒651-2271 兵庫県神戸市西区高塚台 1-5-5  
JASTEC, 5-5, Takatsukadai 1-chome, Nishi-ku, Kobe, Hyogo,  
651-2271 Japan

<sup>†</sup> E-mail: t-miyazaki@kobelco.jp



**Fig. 1** A view of world highest 930 MHz superconducting magnet using Nb<sub>3</sub>Sn wire with a high Sn-content bronze matrix in NIMS, Tsukuba.

し<sup>12-14)</sup>, 当時世界最高の920 MHz NMR マグネットの開発に成功した<sup>15)</sup>. その後, さらに線材の改良を進め930 MHz マグネットも開発した<sup>16)</sup>. **Fig. 1**にNIMSに設置された930 MHz マグネットの外観を示す.

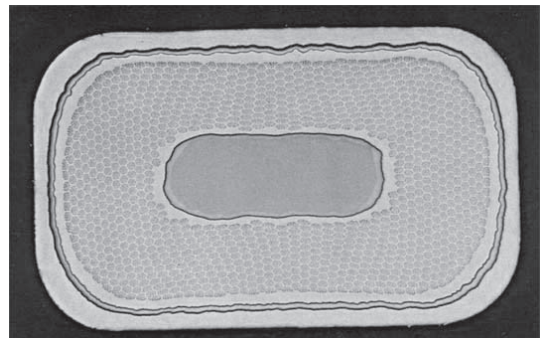
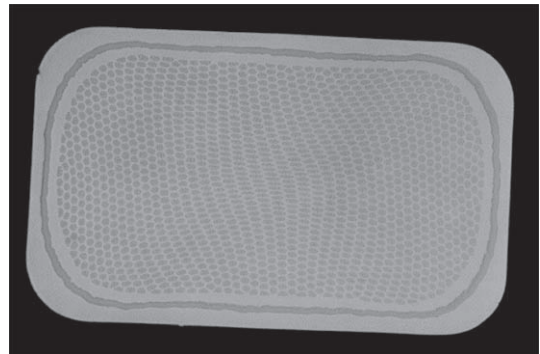
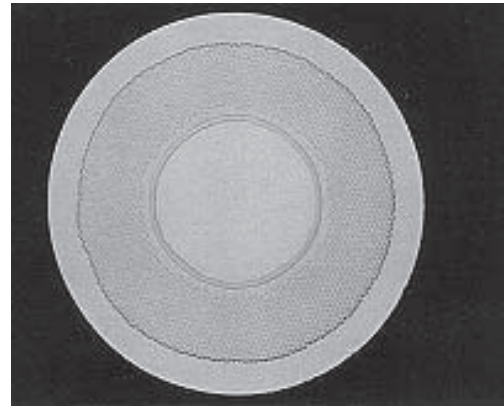
事業形態の面では, 2002年にそれまで神戸製鋼所内で行っていた線材事業と, JMTとして行っていたマグネット事業を統合し, 超電導線材および超電導マグネット専業メーカーであるジャパンスーパーコンダクタテクノロジー(株)(JASTEC)を設立した. 現在はJASTECが超電導線材およびマグネットの製造販売を行い, 神戸製鋼所は主に研究開発を分担し, グループの超電導事業における新規メニュー創出の役割を担っている.

特に最近では, Nb<sub>3</sub>Sn線材の開発において, 最近のNMRマグネットの更なる高磁場化と中磁場機種のコンパクト化の要求に対応して, 太刀川ら<sup>17)</sup>により発見されたTa-Sn溶融拡散粉末を用いた粉末法線材の開発を行っている. 2002年からは, 科学技術振興機構の支援をうけ, 現在本線材の実用化開発に取り組んでいる.

### 3. ブロンズ法 Nb<sub>3</sub>Sn 線材

#### 3.1 線材の種類

現在, 民生分野で量産されているNb<sub>3</sub>Sn線材の大部分は, 長尺, 均一加工が容易なことから, ブロンズ法で製作されている. **Fig. 2**には現在, 主にNMRマグネット用として商用化されているブロンズ法Nb<sub>3</sub>Sn線材の典型的な断面を示す. (a)は安定化銅を線材断面中央部に配置した内部安定化線材, (b)は同じく安定化銅を外周部に配置した外部安定化



**Fig. 2** Typical cross-sections of the bronze-processed Nb<sub>3</sub>Sn Superconducting wires. a) Internally stabilized, b) Externally stabilized and c) Externally stabilized and Ta reinforced.

線材である. (c)は線材中央部にTa補強材を配置し機械的特性を高めた線材である. それぞれ, マグネットの設計に合わせて使用されている.

NMRマグネットには, 高磁場の発生, 発生磁場の時間的安定性および空間均一度が要求される. 特に, 前の2点については用いられる線材の特性による部分が大きい. 具体的には, 高磁場中での高い $J_c$ , 高 $n$ 値などである. また, 高磁場化に伴って, 線材に印加される電磁力も高くなることから, 線材の機械的特性の改善も必要となってくる. ここでは, 以下に臨界電流密度の改善,  $n$ 値の改善, 機械的特性の改善の三点についての研究開発の成果を述べる.

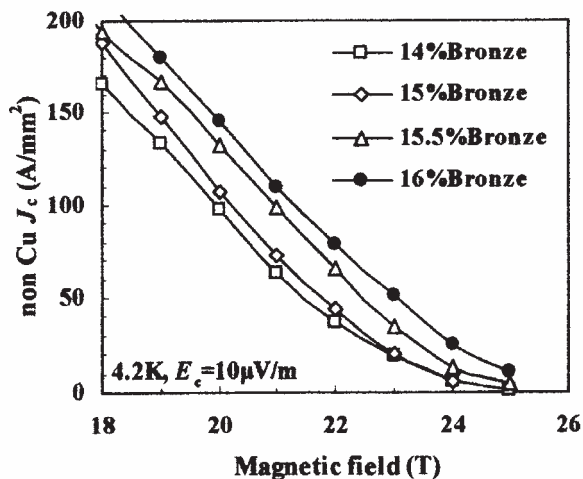


Fig. 3 Dependence of  $J_c$  on the magnetic field for the wires with different Sn contents in the matrix.

### 3.2 臨界電流密度の向上

$Nb_3Sn$  の量子化磁束のピン止め中心は結晶粒界といわれており、微細な結晶粒の  $Nb_3Sn$  ほど高  $J_c$  となる。また、特に 20 T を超える高磁場領域では高い上部臨界磁場 ( $H_{c2}$ ) を持つ線材ほど高い  $J_c$  を実現できる。このような  $J_c$  に影響を及ぼす因子としては、ブロンズ中の Sn 濃度、熱処理条件、フィラメント径、ブロンズ比、微量元素添加などがあるが、ここではブロンズ中の Sn 濃度が  $J_c$  に及ぼす影響と  $J_c$  とフィラメント径の関係について述べる。

ブロンズ法  $Nb_3Sn$  線材において Sn はブロンズマトリックスから供給される。そのブロンズ中の Sn 濃度は、 $Nb_3Sn$  の生成にあたって、結晶粒径、化学組成などに大きな影響を及ぼし、最終的には線材の  $J_c$  を規定する非常に重要な因子である。

Fig. 3 に各 Sn 濃度のブロンズマトリックスを用いた線材の  $J_c$  の磁場依存性 ( $J_c$ - $B$  特性) を示す。この図から明らかのように、Sn 濃度が増大するにつれて、 $J_c$  が向上する。

この原因を明らかにするためにブロンズ中の Sn 濃度の異なる 13, 15wt% と異なる 2 線材についてマイクロ組織の分析を行った。700°C、100 時間の生成熱処理を施した線材のフィラメント破断面の SEM 像を Fig. 4 に示す。これより、明らかに高 Sn 濃度線材の方が結晶粒径が小さくなっていることがわかる。

一方、両線材の  $J_c$ - $B$  特性を Kramer plot した結果を Fig. 5 に示す。これより、ブロンズ中の Sn 濃度が異なっても、上部臨界磁場  $H_{c2}$  はほぼ同程度であることがわかる。反応層中の EDX による成分分析の結果からも、ブロンズ中の Sn 濃度の差による反応層中の Sn 量の差はほとんど見られなかった。

一方、両線材の反応後の断面の反射電子像の比較から各フィラメントあたりの残留 Nb 面積率 (RNR, Residual Nb

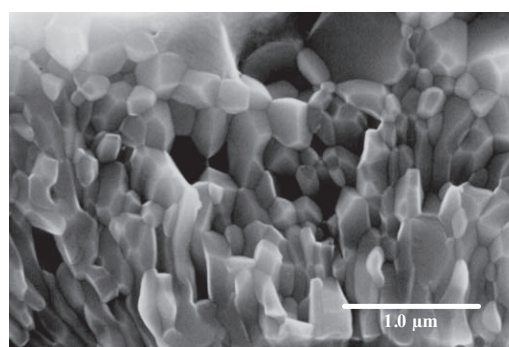
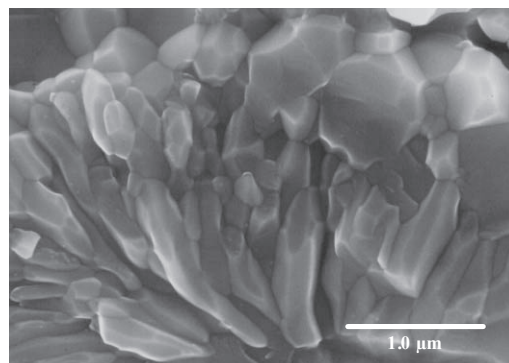


Fig. 4 Microscopic photos for the broken cross-section of the filament in the wire using 13% Sn bronze (above) and 15% Sn bronze (below) as viewed by SEM.

Ratio) を求めた結果、13%材が  $16.8 \pm 5.1\%$  であったのに対して 15%材は  $10.5 \pm 6.6\%$  であった。このことから 15%材のほうが RNR が小さく、より厚い  $Nb_3Sn$  層が生成されていることがわかった。以上のことから、ブロンズ中の Sn 濃度による  $J_c$  の増加は、結晶粒の微細化と反応量の増加によること

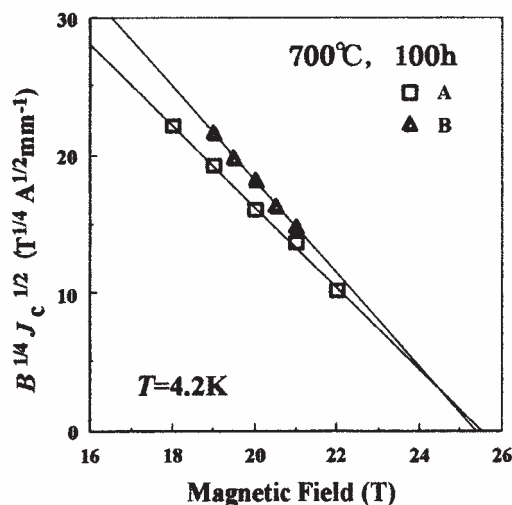


Fig. 5 Results of the Kramer's plots for  $J_c$ - $B$  data of the wire using 13% Sn bronze (A) and 15% Sn bronze (B).

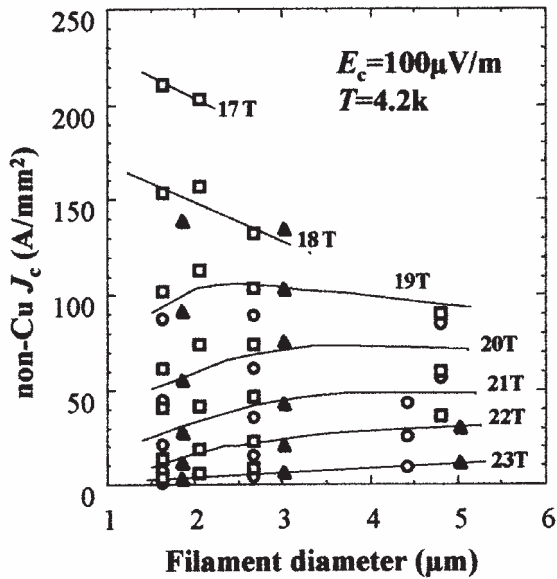


Fig. 6 Dependence of  $J_c$  on the filament diameter at each magnetic field.

が明らかとなった<sup>18)</sup>.

このように、ブロンズ中の Sn 濃度が増加すると  $J_c$  は大きく改善されるが、一方で Cu 中への Sn の固溶限界は 15.8 wt% であり、それを超えると硬くて脆い金属間化合物の生成により加工性が劣化してしまう。我々は加工プロセスを改善することでこの固溶限界を越えた 16 wt%材の実用化に成功し、930 MHz マグネットに適用している。今後のさらなる高磁場化の検討には、線材設計と加工プロセスの両面からの開発が不可欠である。

次に、線材のフィラメント径は、線材設計上重要なパラメータである。我々は、線材の線径を変化させることでフィラメント径を変化させ、各フィラメント径をもつ試料について  $J_c$ - $B$  特性を測定し、各磁場での  $J_c$  のフィラメント径依存性を明らかにした。

Fig. 6 には各磁場での  $J_c$  のフィラメント径依存性を示す。これより、19 T あたりを境として低磁場側と高磁場側とで  $J_c$  のフィラメント径依存性が異なることがわかる。すなわち、低磁場側で  $J_c$  は細いフィラメント径の線材のほうが高くなる傾向にあるのに対して、高磁場側では逆に太いフィラメント径のほうが  $J_c$  が高くなる傾向がうかがえる。低磁場側でのフィラメント径依存性は、フィラメント径が小さくなると生成する  $Nb_3Sn$  層の面積率が相対的に増加することで説明されるが、高磁場側の依存性の原因については、以下のように考察した。各試料の  $J_c$ - $B$  特性の Kramer plot から求めた  $H_{c2}$  は、フィラメント径とともに増加しており、これが高磁場側での  $J_c$  のフィラメント径依存性に関連すると思われる。このような  $H_{c2}$  のフィラメント径依存性の原因については、試料に印加される電磁力による  $Nb_3Sn$  層への歪などの影響が考えられるが、定量的な解明にはいたって

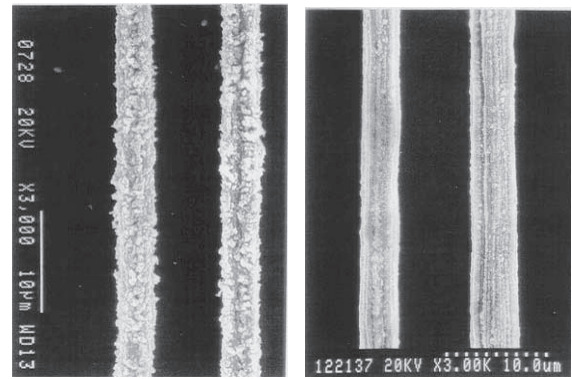


Fig. 7 Comparison of filament surfaces processed by different annealing temperatures; higher (left) and lower (right) temperature.

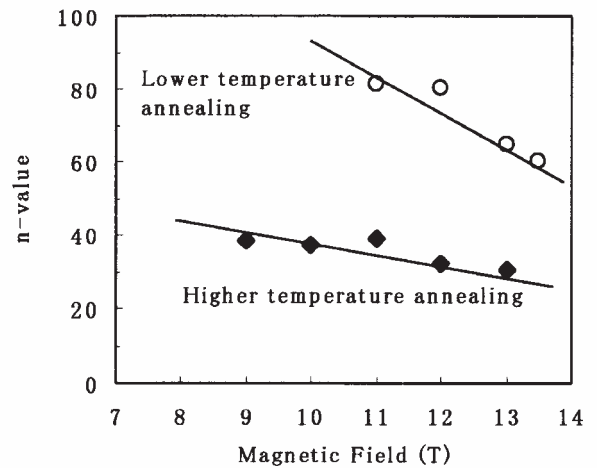


Fig. 8 Dependence of non-Cu  $J_c$  on the magnetic field for the sample processed under different annealing conditions.

いない。

### 3.3 n 値の改善

永久電流モードで用いられる NMR マグネットにとって  $n$  値は、 $J_c$  とともに重要な特性である。 $n$  値はフィラメントの表面形状との相関が指摘されている<sup>19)</sup>。均一なフィラメントほど高い  $n$  値を実現できる。実際にフィラメント形状、ひいては  $n$  値に影響を及ぼす製造上の条件として、構成部材の変形抵抗差や加工率などが考えられるが、それらなかの一つとして、我々は中間焼鈍熱処理条件に着目した。ブロンズ法  $Nb_3Sn$  線材では、加工途中でブロンズが著しく加工硬化するため、焼鈍熱処理を十数回以上施す。その過程でフィラメント表面に化合物が生成し、それが最終線径でのフィラメントの形状に大きな影響を及ぼすことが考えられる。

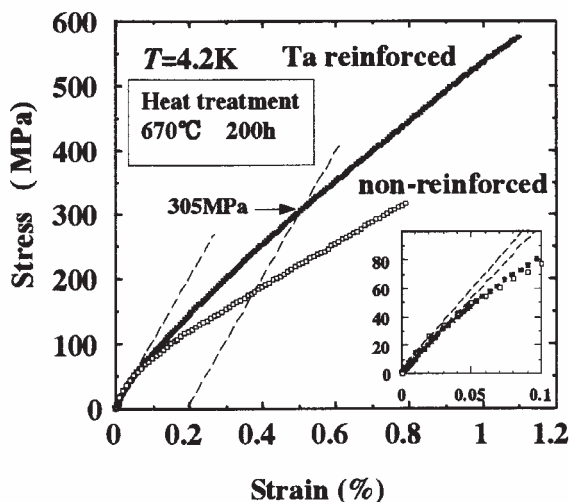


Fig. 9 Stress vs. strain curves for the wire; (a) without a Ta reinforcer and (b) within Ta reinforcer at 4.2 K.

Fig. 7には各焼鈍条件で作製した線材のフィラメント形状を示す。これより、高温で焼鈍した線材のフィラメントは明らかにフィラメント表面の凹凸が激しいことがわかる。次に、両線材の  $n$  値の磁場依存性を Fig. 8 に示す。これより、表面の凹凸の著しい線材のほうが、 $n$  値は明らかに低いことがわかった。よって、実際の線材製造では、加工性が回復する範囲内で可能な限り低温、単時間の焼鈍熱処理を施すことで高い  $n$  値を実現できることが明らかとなった。

### 3.4 機械的特性の改善

我々は、線材の強度を高めるために、以下の3つの理由で、Taを補強材として採用した<sup>20)</sup>。1) bcc結晶構造を有することから、低温での強度の向上が期待できること、2) 融点が3263 Kと高く、 $Nb_3Sn$ 生成時の熱処理による焼鈍効果が少ないこと、3) 4.2 Kでの抵抗率が $2.9 \times 10^{-9} \Omega m$ と低く、安定化材としても有効であろうということ。こうした理由により、Fig. 2(c)に示すような、線材中央部にTaを補強材として配置した高強度 $Nb_3Sn$ 線材を開発した。この線材の4.2 Kにおける応力-歪曲線を、非補強材のものと比較してFig. 9に示す。この図より、明らかにTa補強材で機械的強度が向上したことがわかる。非補強材の0.2%耐力が170 MPaであったのに対して、Ta補強材は305 MPaを示した。これより、Taを補強材として用いることにより、0.2%耐力が1.7倍に改善された。

## 4. Ta-Sn粉末法 $Nb_3Sn$ 線材

本製法は太刀川ら<sup>17)</sup>によって提案されたもので、TaとSnの粉末を溶融拡散熱処理し、Ta-Sn化合物を得、それを粉碎したものをNbまたはNb-Ta合金シースに充填して、伸線加工するものである。特に、高磁場領域で非常に高い $J_c$ が報告されている。我々はこの製法の実用化に取り組み、ブロンズ法線材に次ぐ次世代高磁場 $Nb_3Sn$ 線材の開発を行って

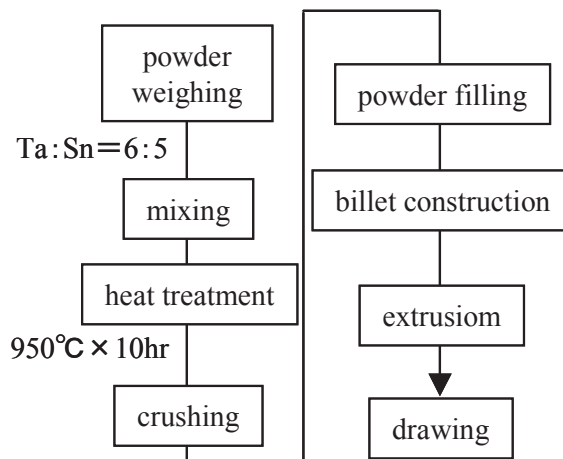


Fig. 10 Diagram for the Ta-Sn powder-in-tube wire process.

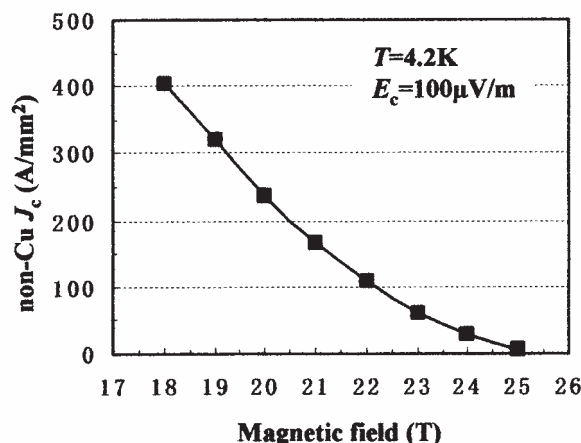


Fig. 11  $J_c$ - $B$  characteristics of the mono core Ta-Sn powder-in-tube (TS-PIT) wire.

いる。

### 4.1 単芯線材

Fig. 10に本製法を模式的に示す。まず、Sn及びTa粉末を6:5の割合で混合した後、真空中で950°C、10時間の熱処理を施しTa-Sn化合物を得る。これを粉碎し、Nb-7.5wt%Taシース中に充填しさらに無酸素銅からなるビレットに挿入した後、静水圧押出、ダイス伸線を経て、線径1.0mmの単芯試料を製作した。この線材に、真空中で650°C、250時間の熱処理を施し、 $Nb_3Sn$ を生成させた。この線材の4.2 Kにおけるnon-Cu  $J_c$ の磁場依存性をFig. 11に示す。本単芯線材の21 Tにおけるnon-Cu  $J_c$ は170 A/mm<sup>2</sup>であった。Fig. 12(a)には、単芯線材の反応前の断面を示す。より低温にすることで、 $J_c$ - $B$ 特性が2.5 Tだけ高磁場側にシフトするとすると、23.5 Tで100 A/mm<sup>2</sup>以上のoverall  $J_c$ を持つことになる。さらに、反応後の断面観察より、この単芯線ではシース部の約半分程度が反応層になっていることがわかった。これよ

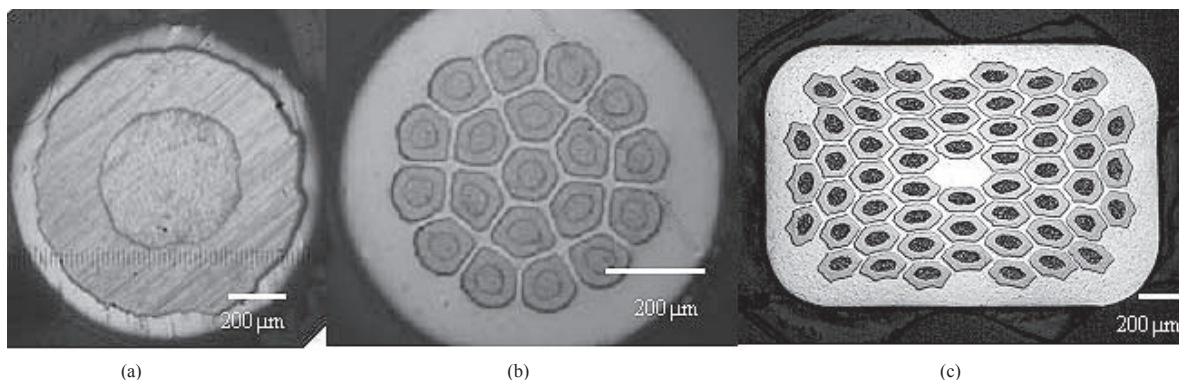


Fig. 12 Typical cross-sections of multi-filamentary test wires fabricated using the Ta-Sn powder-in-tube (TS-PIT) process.

り、反応量を増加させることで、現状の約2倍の non-Cu  $J_c$  まで実現可能であることがわかった。これらのことから、本製法による線材は 1 GHz マグネット用線材としてのポテンシャルを十分持つことが確認できた。

#### 4.2 実用化への取り組み

この製法の線材について、多芯化、長尺化に向けた取り組みを行っている。Fig. 12(b) に静水圧押し出しにより、約 10 kg のピレットを用いて作製した 19 芯線材の断面を示す。これにより加工条件の最適化を行った上で、Fig. 12(c) に示すような断面を持つ 50 kg 級の 54 芯平角線材の開発を行っている。

#### 5. まとめ

神戸製鋼所および JASTEC における  $Nb_3Sn$  線材開発の経緯の概略と、最近の代表的な開発成果について紹介した。我々グループの線材開発の特徴は、NMR 用途への課題の絞込みと、マグネットと一体になった問題解決の取り組みにある。主力メニューであるブロンズ法線材においては、 $J_c$ ,  $n$  値、機械的特性の改善を行い、これら成果を用いた線材を 930 MHz マグネットに適用し、世界最高磁場を更新した。さらに今後は 1 GHz マグネットの開発に向けて、 $Nb_3Sn$  線材の  $H_{c2}$  の限界にどこまで迫れるかが大きな課題である。そのために、日本発、大学発の新プロセスである Ta-Sn 粉末法線材の実用化に取り組んでいる。一方、事業競争力強化の観点からは、このような世界トップフロントでの競争により得られた成果を、いかに量産製品メニューへフィードバックするかが今後の重要な課題である。

ここに紹介した成果を得るにあたって、物質・材料研究機構、科学技術振興機構、東海大学、東北大学、東京大学、九州大学、新エネルギー・産業技術統合研究開発機構の関係者の皆様はじめ多くの方々のご指導、ご協力を得ましたことをここに感謝申し上げます。

#### 参考文献

- 1) B.T. Matthias, T.H. Geballe, S. Geller and E. Corenzwit: "Superconductivity of  $Nb_3Sn$ ," *Phys. Rev.* **95** (1954) 1435
- 2) 堀内健文ら:「(株)神戸製鋼所「超電導・極低温グループ」, *低温工学* **22** (1987) 386-389
- 3) M. Uchida and T. Horiuchi: "Superconducting transition temperature in the pseudo-binaries  $V_3Al-V_3Si$ ,  $V_3Al-V_3Ga$ ,  $V_3Al-V_3Ge$ ,  $V_3Al-V_3Sn$  and  $V_3Al-V_3Sb$ ," *J. Cryo. Soc. Jpn.* **6** (1971) 22-28 (in Japanese)  
内田光夫, 堀内健文:「 $V_3Al-V_3Si$ ,  $V_3Al-V_3Ga$ ,  $V_3Al-V_3Ge$ ,  $V_3Al-V_3Sn$ ,  $V_3Al-V_3Sb$  系の超伝導遷移温度」, *低温工学* **6** (1971) 22-28
- 4) T. Tatara, private communication.
- 5) M. Iwakuma, et al.: "Development of a powder-metallurgy processed  $Nb_3Sn$  wire," *J. Cryo. Soc. Jpn.* **22** (1987) 186-192 (in Japanese)  
岩熊成卓ら:「粉末法  $Nb_3Sn$  線材の開発」, *低温工学* **22** (1987) 186-192
- 6) N. Matsukura, et al.: "Effect of tantalum addition on hysteresis losses and critical current densities of powder-metallurgy processed  $Nb_3Sn$  superconducting wires," *Adv. Cryo. Eng.* **42** (1996) 1345-1350
- 7) N. Matsukura, et al.: "Effect of niobium concentration on critical current density and hysteresis loss of power-metallurgy processed  $Nb_3Sn$  superconducting wire," *J. Jpn. Inst. Metals* **61** (1997) 807-813 (in Japanese)  
森倉功和ら:「粉末法  $Nb_3Sn$  線材の臨界電流密度と履歴損失に及ぼすニオブ濃度の影響」, *日本金属学会誌* **61** (1997) 807-813
- 8) T. Miyazaki, et al.: "Effect of heat treatment on critical current density and  $n$ -value of  $(Nb,Ti)_3Sn$  multifilamentary superconducting wire," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **5** (1995) 1781-1784
- 9) T. Miyazaki, et al.: "Improvement of critical current density of bronze processed  $Nb_3Sn$  superconducting wire," *Adv. Cryo. Eng.* **42** (1996) 1385-1390
- 10) T. Miyazaki, et al.: "Comparison of properties between bronze-processed  $Nb_3Sn$  wires with different tin content," *Proc. ICEC16/ICMC* (1997) 1739-1742
- 11) 吉川正敏: 低温工学協会関西支部編「低温工学の奇跡-関西支部発足 30 周年記念特集」 (2003) 146-145

- 12) T. Miyazaki, et al.: "Development of bronze-processed Nb<sub>3</sub>Sn superconductors for 1GHz NMR magnets," Adv. Cryo. Eng. **44** (1998) 935-941
- 13) T. Miyazaki, et al.: "Improvement of critical current density in the bronze-processed Nb<sub>3</sub>Sn superconductor," Adv. Cryo. Eng. **44** (1998) 943-949
- 14) T. Miyazaki, et al.: "Development of Nb<sub>3</sub>Sn superconductors for 1GHz NMR magnet – dependence of high-field characteristics on tin content in bronze matrix –," IEEE Trans. Appl. Supercond. **9** (1998) 2505-2508
- 15) T. Kiyoshi, et al.: "Persistent-mode operation of a 920 MHz high-resolution NMR magnet," IEEE Trans. Appl. Supercond. **12** (2002) 711-714
- 16) M. Yoshikawa, et al.: "Development of a 930 MHz magnet," J. Cryo. Soc. Jpn. submitted.  
吉川正敏ら:「930 MHz NMR マグネットの開発」, 低温工学投稿中
- 17) K. Tachikawa, S. Yamamoto, T. Yokoyama and T. Kato: "New High-Field Nb<sub>3</sub>Sn Conductors Prepared from Ta-Sn Compound Powder," IEEE Trans. Appl. Supercond. **9** (1999) 2500-2504
- 18) T. Miyazaki et al.: "Development of superconductors for 1GHz NMR magnet –high critical current density (Nb,Ti)<sub>3</sub>Sn conductor –," J. Cryo. Soc. Jpn. **33** (1998) 724-732 (in Japanese)  
宮崎隆好ら:「1GHz 級 NMR マグネット用超電導導体の開発 –高臨界電流密度(Nb, Ti)<sub>3</sub>Sn 導体–」, 低温工学 **33**(1998) 724-732
- 19) W.H. Warnes and D.C. Labalestier: "Critical current distributions in superconducting composites," Cryogenics **26** (1986) 643-704
- 20) T. Miyazaki, et al.: "Development of superconductors for 1GHz NMR magnet –high yield strength (Nb,Ti)<sub>3</sub>Sn conductor–," J. Cryo. Soc. Jpn. **33** (1998) 724-732 (in Japanese)  
宮崎隆好ら:「1GHz 級 NMR マグネット用超電導導体の開発 –高耐力 (Nb, Ti)<sub>3</sub>Sn 導体–」, 低温工学 **35**(2000) 126-131

宮崎隆好



1965年7月23日生。1989年九州大学理学部物理学科卒業。1991年3月同大学大学院理学研究科修士課程修了。同年(株)神戸製鋼所入社。1998年12月科学技術庁科学技術政策局へ出向, 2000年12月帰任。主として金属系超電導線材の研究開発に従事。低温工学協会会員。工学博士。

加藤弘之



1964年5月31日生。1991年大阪大学基礎工学部物性物理工学科卒業。同年4月(株)神戸製鋼所入社。超電導線材の製造, 開発に従事。現在に至る。低温工学協会会員。

財津享司



1978年4月6日生まれ。2001年3月九州大学工学部物質科学工学科卒業。2003年3月同大学大学院工学府修士課程修了。同年(株)神戸製鋼所入社。主として金属系超電導線材の研究開発に従事。低温工学協会会員。

宮武孝之



1957年9月生。1981年大阪市立大学工学部応用物理学科卒業。1983年同大学院工学研究科前期博士課程修了。同年(株)神戸製鋼所入社。(財)国際超電導産業技術研究センター超電導工学研究所出向, 開発企画および経営企画業務を経て, 現在主として金属系超電導線材の研究開発に従事。低温工学協会会員。工学博士。

濱田衛



1955年3月5日生。1977年3月大阪大学理学部物理学科卒業。1979年3月大阪大学大学院理学研究科物理学専攻前期課程修了。同年4月(株)神戸製鋼所入社。1989年11月ジャパンマグネットテクノロジー(株)へ出向。1999年4月(株)神戸製鋼所へ帰任。現在, 電子技術研究所に勤務。主として超電導マグネットの開発に従事。低温工学協会, 日本物理学会会員。工学博士。

村上幸伸



1967年8月28日生。1992年3月神戸大学大学院工学研究科機械工学専攻修士課程終了。同年4月(株)神戸製鋼所入社。2002年4月よりジャパンスーパーコンダクタテクノロジー(株)へ出向。主に超電導線材の開発に従事。低温工学協会, 日本機械学会会員。

長谷隆司



1962年2月6日生まれ。1986年3月名古屋大学大学院工学研究科応用物理学専攻前期課程修了。同年4月(株)神戸製鋼所入社。1989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出向, 1993年帰任。以後, 酸化物系および金属系超電導線材の研究開発に従事。現在, ジャパンスーパーコンダクタテクノロジー(株)に出向中。低温工学協会, 日本金属学会, 電気学会会員。工学博士。