タンタル繊維を用いた繊維強化型 Nb₃Sn 超電導線材の特性

正員 新井 和 昭 (電 総 研)

正員 梅 田 政 一 (電 総 研)

正員 我 妻 洸 (電 総 研)

正員 立 石 裕 (電 総 研)

Superconducting Properties and Uniaxial Strain Characteristics of Nb₃Sn Fiber-Reinforced Superconductors with Tantalum Reinforcement Fibers

Kazuaki Arai, Member, Masaichi Umeda, Member, Koh Agatsuma, Member, Hiroshi Tateishi, Member
(Electrotechnical Laboratory)

We have been developing fiber-reinforced superconductors (FRS) for high-field and large-scale magnets. Tungsten fibers have been selected as the reinforcement fiber for FRS so far because tungsten has the highest elastic modulus of approximately 400 GPa which can minimize the strain from electromagnetic force. The preparation process of FRS consists of sputtering deposition and heat treatment because it may be difficult to apply drawing methods to materials of high-elastic modulus such as tungsten. Tantalum has high elastic modulus of 178 GPa and its thermal expansion coefficient that is closer to that of Nb₃Sn than tungsten's, which means prestain in Nb₃Sn in FRS is reduced by adopting tantalum fibers. Tantalum has been used as barriers between bronze and copper in conventional Nb₃Sn superconductors which are usually prepared with drawing process despite of the tantalum's high elastic modulus. That implies drawing process may be applied to prepare FRS with tantalum reinforcement fibers. In this paper, FRS using tantalum fibers prepared with sputtering process are described with making comparison with FRS of tungsten to clarify the basic properties of FRS using tantalum fibers. Depth profiles in Nb₃Sn layer in FRS were measured to examine reaction between superconducting layers and reinforcement fibers. Superconducting properties including strain and stress characteristics were shown. Those data will contribute to design of FRS using tantalum reinforcement fibers with adopts the drawing processes.

キーワード：超電導線材，Nb₃Sn，弾性率，繊維強化，ひずみ，タンタル

1. はじめに

トカマク型核融合炉においては、OH コイル (Ohmic Heating Coil) と呼ばれる。プラズマを誘導加熱するための変流器コイルが必要である。OH コイルは炉の中心部に置かれ、1 秒程度の時間で所定の磁界を発生するパルスマグネットである。トカマク炉のパルスの熱負荷を軽減して準定常化を図るとともに、炉が過大になることを避けるために、近年発生磁束量の増大が要求されるようになってきている。10 T を超える高磁界を発生するためには、合金系では、臨界磁界の制限から困難となり、Nb₃Sn に代表される化合物系の超電導材料を使用しなければならない。しかしながら、よく知られているように化合物系材料の超電導特性はひずみの印加により低下する。運転時に発生するフープ応力により、導体に大きなひずみ加わり、

超電導特性が大きく劣化し、大型の高磁界マグネットではこれが深刻な問題になる。

このような課題を解決するため、著者らは図 1 に示したような繊維強化型超電導線材 (Fiber-Reinforced Superconductor; FRS) の研究を進めている^{(1)~(3)}。この線材は中心の高強度繊維と、その周囲に配置された薄膜状の超電導層からなるフィラメントを基本構造とする。芯線は高強度かつ高弾性率の繊維であり、フープ応力を支持し、超電導層にかかるひずみを小さくする機能をもつ。超電導層としては、実用線材として使用実績が豊富な Nb₃Sn を採用しているが、原理的には Nb₃Al あるいは酸化物超電導材料など他の材料でも可能である。なお、この方式の線材としては、ドイツの KfK⁽⁴⁾ やアメリカの LLL⁽⁵⁾ において、NbN を材料とした研究が行われているが、Nb₃Sn を使用した例は著者らのグループが初めてである。また、超電導

線材の強化方法としてはほかに、ブロンズ法で作成した多芯線に高強度ワイヤを添えることによって強化する方法⁽⁶⁾、あるいは、マトリックスとして鋼ニオブ合金⁽⁷⁾などを採用することにより、マトリックス自体を強化する方法があるが、Nb₃Sn フィラメントの内部を直接強化する著者らの方法とは異なる。

芯線となる強化繊維は、材料の弾性率が高いほど引張ストレスに対し、ひずみを少なくできることから、著者らは、単金属として最高レベルの弾性率をもつタングステンを強化繊維として用いている^{(1)~(3)}。従来の Nb₃Sn 超電導線材は、一般に複合加工法により作成されているが、繊維強化型超電導線材にこれを適用する場合、強化繊維の硬さが高いため、その適用にも限界があるのでスパッタ法を用いている。そこで、従来の複合加工法の技術を繊維強化型 Nb₃Sn 超電導線材に適用するため、タングステんに代わり、タンタルを用いることが考えられる。タンタルは、他の金属と比較し、弾性率が高いが、複合加工法による従来の Nb₃Sn 線材に組み込まれ、銅とブロンズの反応を防ぐバリアとして使われている実績がある⁽⁸⁾。

本論文では、タンタルを強化繊維とする繊維強化型 Nb₃Sn 超電導線材をスパッタ法を用いて製作し、その諸特性を明らかにし、将来、複合加工法を用いて繊維強化型 Nb₃Sn 超電導線材を作製する場合の指針を与えることを目的とする。

2. 強化繊維の性質

タンタルは、周期律表においてタングステンの隣に位置し、双方とも硬いあるいは、融点が高いなどの類似した性質をもつ。硬いことは強化繊維として補強効果が高いことを意味し、融点が高いことは熱処理などを受けた場合、強化繊維自身から超電導層への拡散が低いこと、つまり Nb₃Sn 層への不純物として入り込みにくいことを意味する。タングステンとタンタルの強化繊維として重要と思わ

図 1 繊維強化型超電導線材の概念図
Fig.1. Schematic diagrams of FRS.

れる諸定数を表 1 に示す^{(9)~(12)}。同表の熱収縮量は、材料を 1,000 K から 4.2 K に冷却したときの、応力フリー状態での熱収縮量を示す。1,000 K は、Nb₃Sn を生成させるために線材が受ける熱処理温度であり、4.2 K は線材を超電導状態で使用するための冷媒の液体ヘリウムの温度である。Nb₃Sn 単体の、同じく熱収縮量は 0.74% であるが⁽¹³⁾、タンタルのそれに近いので、タンタルを用いた繊維強化型超電導線材が、タングステンのものより冷却に伴うプリストレイン（超電導部分が、冷却時に受けるひずみ）が小さくなる。

タンタルは、大型高磁界マグネット用導体の強化材として使うための検討が進められており、機械的な強化材の機能だけでなく、電気的な安定化材としても使えることが指摘されている⁽¹⁴⁾。直径 1 mm、純度 99.95% のタンタルワイヤの抵抗率は図 2 において、□印で示すとおり 15 T でも $3.5 \times 10^{-9} \Omega \cdot m$ と低レベルである。本論文で用いる直径 50 μm の純度は同じく 99.95% のタンタル繊維についても、どの程度であるかを調べるため、四端子法を用いて液体ヘリウム中において抵抗率を測定したが、同図○印で示すとおりワイヤより高めの値が得られた。ワイヤと比較して抵抗率が高くなるのは、直径を小さくするための強加工を受けたことにより上昇したものと考えられる⁽¹⁵⁾。したがって、本タンタル繊維を用いる場合は、銅などを併用し安定化を図る必要があると言える。

なお、同図にはタンタル繊維と同じ直径のタングステン

図 2 強化繊維の抵抗率の磁束密度依存性
Fig.2. Resistivity dependence on applied magnetic field of reinforcement fiber of tantalum and tungsten at 4.2 K.

表 1 タンタルとタングステンの物性値
Table 1. Properties of tantalum and tungsten.

材料	弾性率 (GPa)	熱収縮 (1,000 K→4.2 K) (%)	抵抗率 (室温) ($\times 10^{-8} \Omega \cdot m$)	融点 (°C)	臨界温度 K
タンタル	178	0.62	13.1	2996	4.47
タングステン	405	0.42	5.33	3410	0.0154

図 3 繊維強化型 Nb₃Sn 超電導線材の試作手順
Fig. 3. Preparation process for FRS specimens.

繊維（本論文で使用するもの、純度は 99.95%）の抵抗率も示した。この抵抗率は、磁界依存性が高いが、15 T 以下ではタンタルより低い値であった。

3. 線材の作成

繊維強化型超電導線材は図 3 (a) に示したように、強化繊維上のブロンズ、ニオブおよび銅を、逐次スパッタした後、真空中での熱処理によって Nb₃Sn 層を生成させるという手法で試作した。スパッタに用いたブロンズターゲットの錫濃度は、16 重量%、純度はニオブが 3 N、銅とブロンズは 4 N である。スパッタは、初めにチャンバ内を 1.0×10^{-6} Torr 程度に真空引した後、ブロンズ、ニオブ、銅をアルゴンガス圧 5×10^{-3} Torr、ターゲット入力パワー 200 W（ターゲットの直径はすべて 76.2 mm）の条件でそれぞれ 1 時間ずつスパッタする。強化繊維上のブロンズ、ニオブ、銅の膜厚はそれぞれ 1.2, 0.55, 1.0 μm と見積もられる⁽¹⁾。スパッタ後に、 1×10^{-5} Torr の真空雰囲気中において、380°C×2 時間と 725°C×1 時間の熱処理を連続して加え、ブロンズ中の錫とニオブを反応させ、Nb₃Sn 層を生成させた。試料名は、強化繊維がタンタル繊維の場合を試料 Ta、タングステン繊維の場合を試料 W₁ とする。強化繊維の直径は、双方とも 50 μm 、長さ 100 mm、純度は 99.95% である。なお、この熱処理条件は、両試料の臨界電流密度を最大にする条件である。

4. 臨界電流密度と上部臨界磁界

前章において試作した試料 Ta₁ と W₁ の液体ヘリウム中での臨界電流を 0.1 $\mu\text{mV/cm}$ の条件で測定した結果を図 4 に示す。同図縦軸は、熱処理前のニオブとブロンズの断面積当たりの臨界電流密度を示す。試料 Ta₁ は、W₁ より高い値を示し印加磁界が高くなるに従い、W₁ より相対的に臨界電流密度が向上する傾向がみられる。

この点を上部臨界磁界 B_{c2}^* の点から調べるため、図 4 の 10 T 以上のデータを用いて Kramer プロット⁽¹⁶⁾を行った結果、試料 Ta₁, W₁ の B_{c2}^* は、それぞれ 22.3, 20.2 T となった。これからの、試料 Ta₁ の高磁界特性が向上し

図 4 臨界電流密度の印加磁界特性
Fig. 4. Critical current density dependence on applied magnetic field. Vertical axis indicates critical current per cross sectional area of initial niobium and bronze.

ていることが分かる。

超電導線材は、一般に冷却時には、超電導部分とこれ以外の線材の構成要素の線膨張係数の違いから超電導部分にプリストレインが働く。ここで、試料 Ta₁, W₁ の B_{c2}^* について、プリストレインの影響を考慮した考察を行う。

ϵ_0 を Nb₃Sn 層における真のひずみとすると、プリストレイン ϵ_m と印加ひずみ ϵ とは次式の関係がある。

$$\epsilon_0 = \epsilon - \epsilon_m \quad (1)$$

Nb₃Sn 複合多芯線の上部臨界磁界 $B_{c2}^*(\epsilon_0)$ と Nb₃Sn の真のひずみ ϵ_0 は、次式の関係が成立する⁽¹⁷⁾。

$$B_{c2}^*(\epsilon_0) = B_{c2m}^*(1 - a|\epsilon_0|^u) \quad (2)$$

ここで、 B_{c2m}^* は真のひずみ ϵ_0 が 0 となった場合の上部臨界磁界である。 u と a は定数であり、典型的な値は $u = 1.7$ である。 $a = 900$ (圧縮方向、すなわち $\epsilon_0 < 0$ の場合)、または $a = 1250$ (引張方向、すなわち $\epsilon_0 > 0$ の場合) である。著者らの線材は本質的にはブロンズ法で作成されているので、この値をそのまま用いることにする。試料 Ta₁ と W₁ の Nb₃Sn に働くプリストレイン ϵ_m は、線材の構成要素とその体積率を考慮し、図 1 に示された熱収縮量と弾性率などを用いて、それぞれ 0.1143% と 0.308% と計算される⁽¹⁾。これらの数値を用いて (2) 式を使うと、試料 Ta₁ と W₁ の B_{c2m}^* はそれぞれ 22.6, 21.7 T と求まる。これらの値は双方とも $\epsilon_0 = 0$ における値であるので、単軸方向に熱的ひずみおよび機械的ひずみがない状態での、材料特性のみに依存した上部臨界磁界といえ、タンタルの試料の方が高い値となった。すなわち、タンタルを強化繊維とすると、Nb₃Sn の材料自体の高磁界特性を向上させることが可能であることが分かる。これは、一般に Nb₃Sn は適度なタンタルの添加により高磁界特性が向上することから⁽¹⁸⁾、熱処理過程中にタンタル繊維から Nb₃Sn にタンタルが拡散したことによる特性向上であると言える。これに関連し、次章において、オージェ電子分光法による深さ方向の元素分析を行う。

なお、臨界電流値自体は、14.5 Tにおいて 200 A/mm² 程度であるがスパッタ時に使用するブロンズターゲットのわずかな濃度を上昇させることなどにより約 500 A/mm² 程度まで向上させることが可能である⁽²⁾。

5. 超電導層の深さ方向元素分析

繊維強化型超電導線材は、図 1 (a) に示すように強化繊維は、超電導層に密着しこれを直接補強するため、前章で述べたとおり熱処理により強化繊維から超電導層へ拡散が進み特性に影響を与えることが考えられる。本章では、オージェ電子分光法を用いて線材の深さ方向の元素分析を行い拡散の様子を調べる。

試料 Ta₁ と W₁ の最外層の銅は、安定化材として機能するだけで超電導特性には直接関係なく、また深さ方向の分析の妨げとなるので、図 3 (b) に示したように、ブロンズとニオブのみをスパッタし、銅をスパッタしない試料 Ta₂ と W₁ を作成した。ブロンズとニオブのスパッタ条件と熱処理条件は、試料 Ta₁ W₁ と全く同じである。

オージェ電子分光法を適用するために、まず、試料 Ta₂ をオージェ電子分光装置の試料室に入れ、1×10⁻⁹ Torr まで真空引きした。試料の表面を削るための 18 秒間のアルゴンガスによるスパッタを行うごとに、オージェ電子スペクトルのデータを取り込んだ。この 18 秒間のスパッタは、標準試料の SiO₂ ならばその表面を 3.3 nm の厚さだけ削るものである。分析条件は、加速電子エネルギー 10 keV、入射電流 10 nA、ビーム径は約 50 nm であった。各元素量は、オージェ微分スペクトルからバックグラウンドノイズを引き、各元素の相対感度係数で補正することで求めることができる⁽¹⁹⁾。このように求めたタンタル繊維を強化繊維として用いた試料 Ta₂ の深さ方向の元素分析結果を図 5 (a) に示す。(b) 図は、タングステン繊維を用いた試料 W₂ について同じ手順で求めた結果である。両図とも横軸ゼロは、各試料の表面であり、横軸の値が増えるごとにスパッタ層、強化繊維の内部となる。なお、横軸のスパッタ時間と実際のスパッタにより削った各層の厚さは、必ずしも材料に依存しているのではなく、膜形成の際の堆積状態と熱処理による生成状態などで変わるので、求めることは難しい。

各層の強化繊維であるタンタルとタングステンの拡散度を両図から比較すると、タングステンは拡散が少ないのに比べ、タンタルは明確に超電導層内に拡散がみられる。これらの線材は、Nb₃Sn 線材としては比較的短い 380°C×2 時間と 725°C×1 時間の熱処理を加えているので、このような短時間の熱処理でも強化繊維の材質の違いにより拡散の違いが生じ、これが超電導特性等に影響を与える。一般に、複合加工法による従来の Nb₃Sn 超電導線材は熱処理時間を数十時間から 100 時間程度としているが、複合加工法により繊維強化型 Nb₃Sn 超電導線材を作製すると、このような長時間の熱処理は強化繊維から超電導層へ拡散が過剰となり、超電導特性が劣化する可能性がある⁽¹⁸⁾。繊維

図 5 オージェ電子分光法による線材の深さ方向分析

Fig. 5. Depth profiles by Auger electron spectroscopy for FRS sample Ta₂ and W₂ using a tantalum fiber and a tungsten fiber, respectively.

強化型 Nb₃Sn 超電導線材の場合、超電導特性の低下あるいは強化繊維の変質につながらないように熱処理時間を短くする、あるいは、熱処理温度を低くする必要があるだろう。上記の熱処理条件、380°C×2 時間と 725°C×1 時間は、一つの基準となる。このため、熱処理時間を短くすませるため複合加工時のニオブの厚さを 0.5μm 程度に薄くする必要があると言える。

なお、オージェ電子の微分スペクトルには、酸素と炭素も観測されたが、酸素と炭素は各試料界面付近のみに分布していることから、試料を熱処理あるいはデシケータに保存中に吸収されたものと思われる。

6. 引張特性

既に述べたように、繊維強化型超電導線材の基本思想は線材に加わる長手方向の応力を、高強度繊維によって支持することにより、超電導層に働く引張りひずみを小さくしようとするものである。本章では、試料 Ta₁, W₁ に、単軸方向に応力を印加した場合につき、臨界電流密度特性および応力特性を調べる。

液体ヘリウム中において 10 T の印加磁界のもとで、引張試験装置⁽¹⁾を用いて試料 Ta₁ と W₁ に単軸方向にひずみを加えたときの、臨界電流を測定した。ひずみの測定は、室温での校正がそのまま、液体ヘリウム中での温度で

図 6 臨界電流密度と応力の単軸ひずみ特性
Fig. 6. Uniaxial strain characteristics for specimens Ta₁ and W₁ at 10 T in liquid helium.

も校正値が変化しない伸び計 (MTS 社製) を使用した。その結果を図 6 に○および△印で示す (対応する左縦軸は最大値で規格化した臨界電流密度である)。両試料ともに、臨界電流密度は単調に減少する特性を示す。試料 Ta₁ と W₁ は、強化繊維として Nb₃Sn より線膨張係数の小さいタンタルとタングステンを用いているので、印加ひずみがゼロでも Nb₃Sn には引張的なプリストレインが働いている。図 6 横軸正方向 (引張方向) にひずみを加えると、Nb₃Sn に働くひずみは増加し、臨界電流は単調に低下することになる。第 4 章で述べたように、Nb₃Sn の受けるプリストレインは試料 Ta₁, W₁ それぞれにつき 0.1143% と 0.308% であるので、プリストレインの大きい試料 W₁ のほうが、同図に示すように臨界電流の減少は大きくなる。

両試料の応力-ひずみ特性を、図 6 中に●、▲印で示す。対応する右縦軸は、線材に働く力を強化繊維の断面積で割り算した値である。同図から求めた弾性率は、試料 Ta₁, W₁ はそれぞれにつき 148 GPa および 377 GPa と高い値が得られた。表 1 に示した単結晶の値 178 GPa および 405 GPa より小さいが、一般に金属繊維の線径が細くなると弾性率は単結晶のものに近づくことができることから、線径の更に細いタンタルあるいはタングステン繊維を用いると、この測定値よりも弾性率を向上させることができる⁽¹⁵⁾。

図 6 では、タンタル繊維を用いた試料 Ta₁ は、印加ひずみゼロの状態 Nb₃Sn は 0.1143% の引張熱ひずみを受け、タングステン繊維を用いた試料 W₁ は、印加ひずみゼロの状態 Nb₃Sn は 0.308% のプリストレインを受けているので、これら 2 試料を、真のひずみを横軸にとって整理し直した結果を図 7 に示す。比較のため従来のブロンズ法による Nb₃Sn 線材のデータ⁽²⁰⁾ もプロットした。試料 Ta₁ の正規化した臨界電流密度が真のひずみ 0.1143% においてブロンズ法線材と等しいと仮定した。また、試料

図 7 真のひずみと正規化した臨界電流密度
Fig. 7. Normalized critical current dependence on intrinsic strain at 4.2 K in the applied magnetic field of 10 T.

W₁ の正規化した臨界電流密度は、真のひずみ 0.308% においてブロンズ法線材と等しいと仮定した。真のひずみに対して、各データが互いにほぼ同じ特性を示し、特に 0.5% 以下の領域では一致していることが分かる。これは、繊維強化型 Nb₃Sn 超電導線材が本質的にブロンズ法で作製されているためであると考えられる。

7. 結 論

本論文では、タンタル繊維を用いた繊維強化型 Nb₃Sn 超電導線材を試作し、諸特性を調べることににより、次の結論が得られた。

(1) 純度 99.95%, 線径 50 μm のタンタル繊維の抵抗率は、磁界依存性が少なく、印加磁界が 14.5 T 以下の範囲において、 $2.3 \sim 2.4 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ 程度の値となり、繊維強化型超電導線材の強化繊維として用いるためには、銅などの安定化材を併用する必要がある。

(2) タンタル繊維を用いた繊維強化型 Nb₃Sn 超電導線材は、380°C×2 時間と 725°C×1 時間の比較的短い熱処理によりタンタル繊維から拡散したタンタルが Nb₃Sn に添加される高磁界特性を向上させることができる。

(3) タンタルは、この比較的短時間の熱処理でも Nb₃Sn に侵入するため、複合加工法をタンタル繊維を用いた繊維強化型 Nb₃Sn 超電導線材を作製する場合、従来の Nb₃Sn 線材で行われている長時間 (数十時間~100 時間) の熱処理では、Nb₃Sn 層にタンタルを過剰に添加することになり、超電導特性に影響を与えることを考慮しなければならない。

(4) タンタルを強化繊維とする繊維強化型 Nb₃Sn 超電導線材の弾性率は、タングステンの場合より弾性率は低くなるものの約 150 GPa と高レベルであった。プリストレインは引張方向に働いているが、タングステンの場合よ

りプリストレインは緩和されており、臨界電流密度にはプラスに働く。

(5) タンタルを用いた繊維強化型 Nb₃Sn 超電導線材の真のひずみと正規化した臨界電流の関係は、商用ブロンズ法の特性とほぼ同様の特性を示す。すなわち、タンタルを用いた繊維強化型 Nb₃Sn 超電導線材の正規化した臨界電流特性のひずみ特性は商用ブロンズ線材の正規化した臨界電流密度のひずみ特性から推定できる。

最後に、本研究の機会をいただくとともに、暖かい御支援を賜った、電子技術総合研究所 神本正行エネルギー部長、幸坂紳極限技術部長に厚く感謝の意を表します。また、オージェ電子分光法につき御助言をいただいた、極限技術部 一村信吾総括主任研究官、SEM 観察に際し御協力をいただいたエネルギー部 根岸明主任研究官に深く感謝の意を表します。

(平成9年10月8日受付)

文 献

- (1) 新井和昭・立石 裕・梅田政一・我妻 洸:「繊維強化型 Nb₃Sn 超電導線材の試作と超電導特性」, 電学論 A, 133, 53-62 (平5-1)
- (2) H. Tateishi, K. Arai & K. Agatsuma: "Properties of Multifilamentary Nb₃Sn Fiber-Reinforced Superconductors for High-Field Pulsed Magnets," *IEEE Trans. Appl. Superconduct.*, 5, No. 2, 1587-1590 (1995-6)
- (3) K. Arai, H. Tateishi, M. Umeda & K. Agatsuma: "Superconducting Properties of Meter-Class Multifilamentary Nb₃Sn Fiber-Reinforced Superconductors", *ibid.*, 7, No. 2, 1376-1379 (1997-6)
- (4) M. Dietrich: "Microstructure and Internal Strain Control in NbN on Carbon Fibers", *IEEE Trans. Magn.*, 21, No. 2, 455-458 (1985-3)
- (5) L. Summers, J. Miller & M. Strum: "The Influence of Liquid Metal Infiltration on the Superconducting Characteristics of Niobium Nitride", *Adv. Cryog. Eng. Materials*, 34, 835-842 (1988)
- (6) R. Flükiger, E. Drost & W. Specking: "Effect of Internal Reinforcement on the Critical Current Density of Nb₃Sn Wires", *ibid.*, 30, 875-882 (1984)
- (7) 松川倫明・高橋長衛・山田 弘・能登宏七・佐藤 敬・川辺 寛:「高強度・高伝導率 Cu-Nb 複合線材」, 低温工学, 25, No. 4, 265-269 (1990)
- (8) M. Suenga & A. F. Clark: *Filamentary A15 Superconductors*, (1980) Plenum Press
- (9) 国立天文台編: 理科年表 (平4) 丸善
- (10) 日本金属学会編: 金属データブック (昭45) 丸善
- (11) Y. S. Touloukian, R. K. Kirby, R. E. Taylor & P. D. Desai: *Thermophysical Properties of Matter*, Vol. 12 (1975) IFI/Plenum
- (12) 近角聰信・木越邦彦・田沼静一: 最新元素知識 (昭60) 東京書籍
- (13) D. S. Easton, D. M. Kroeger, W. Specking & C. C. Koch: "A Prediction of the Stress State in Nb₃Sn Superconducting Composites", *J. Appl. Phys.*, 51, No. 5, 2748-2757 (1980-5)
- (14) M. Matsukawa, K. Noto, K. Katagiri, N. Matsuura, M. Ikebe, K. Takahashi, T. Fukutsuka & K. Watanabe: "Heavily Cold Worked High-Purity Ta as a Reinforcing Stabilizer", *IEEE Trans. Magn.*, 28, No. 1, 880-883 (1992)
- (15) C. J. Smithells: *Tungsten* (1952) Chapman and Hall LTD
- (16) E. J. Kramer: "Scaling Laws for Flux Pinning in Hard Superconductors", *J. Appl. Phys.*, 44, No. 3, 1360-1370 (1973-3)
- (17) J. W. Ekin: "Strain Scaling Law for Flux Pinning in Practical Superconductors. Part 1: Basic Relationship and Application to Nb₃Sn Conductors", *Cryogenics*, 20, No. 11, 611-624 (1980-11)
- (18) M. Suenaga, "Optimization of Nb₃Sn", *IEEE Trans. Magn.*, 21, No. 2, 1122-1128 (1985-3)
- (19) 志水隆一・吉原一敏: 実用オージェ電子分光法 (平元) 共立出版
- (20) J. W. Ekin: "Strain Effects in Superconducting Compounds", *Adv. Cryog. Eng. Materials*, 30, 823-836 (1984)

新井和昭 (正員) 1961年1月24日生。1983年横浜国立大学電気工学科卒業。同年4月通商産業省工業技術院電子技術総合研究所入所。主として、超電導の電力応用に関する研究に従事。1995-96年 MIT 客員研究員。現在、エネルギー部主任研究官。工学博士。低温工学協会会員。

梅田政一 (正員) 1944年11月15日生。1965年4月電気試験所(現、電子技術総合研究所)入所。1967年3月東京電機大学工学部電子工学科卒業。主として、化合物超電導体ならびに超電導マグネットの研究、開発に従事。現在、極限技術部主任研究官。工学博士。応用物理学会会員、低温工学協会会員。

我妻 洸 (正員) 1967年3月早稲田大学理工学部電気工学科卒業。同年4月電気試験所(現、電子技術総合研究所)入所。以来、超電導応用および低温工学の研究に従事。1979-80年 MIT 客員研究員。現在、エネルギー部主任研究官。工学博士。低温工学協会会員。

立石 裕 (正員) 1955年7月6日生。1979年東京大学理学部物理学科卒業。同年通商産業省工業技術院電子技術総合研究所に入所。現在、エネルギー部主任研究官。主として、核融合用パルス超電導マグネット、交流超電導技術に関する研究に従事。工学博士。低温工学協会、応用物理学会会員。