

# 高磁界用超電導体の現状と展望

## The Present Status and Future of High-field Superconductors

近年、核融合、磁気浮上、加速器などの分野で、ジュール損なしに強い磁場空間を効率的に発生できる超電導マグネットの研究開発が活発に進められている。超電導マグネット技術の進歩は、高性能で信頼性の高い超電導線材の開発によって初めて可能になったといっても過言ではない。

日立製作所及び日立電線株式会社は、早くからこの分野の仕事に着手し、次に述べるような成果を得た。

- (1) 静水圧押し出し法によるNb-Ti及びNb<sub>3</sub>Sn超電導線材の製造法を確立し、均一かつ良好な特性の極細多心線材の開発に成功した。
- (2) Nb-Ti線材の最適な処理条件の確立により、8 T (テスラ)の磁界で $1.1 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$ 以上の臨界電流密度をもつ線材を開発した。
- (3) 編組み線を試作し、これと同等の電流容量をもつモノリシック線材と比べ交流損失は半であることを確認した。

森合英純\* Hidezumi Moriai  
 石上祐治\* Yûji Ishigami  
 参木貞彦\* Sadahiko Mitsugi  
 多田直文\*\* Naofumi Tada

### 1 緒 言

超電導マグネットは電気抵抗が零であることを利用すると、冷却に要するわずかの電力だけで強い磁場を大容量空間に発生できる。したがって、核融合<sup>1)</sup>、粒子加速器、磁気浮上リニアモーターカー、回転機、MHD (Magnet hydrodynamics: 磁気流体発電)発電、電力貯蔵、物性研究など、強い磁場空間を必要とする分野で超電導技術の応用開発が精力的に進められている。超電導技術は、コイル巻線、液体ヘリウムの冷凍液化、電磁力に耐える構造材、計測、制御などの諸技術とあいまって、高性能な超電導線材の開発に負うところが大きい。

日立製作所と日立電線株式会社は緊密な関係のもとに、開発初期の段階から積極的に取り組みNb-Ti, Nb-Ti-Zr, Nb<sub>3</sub>Snなどの高性能超電導線とその製造法を開発を行なって、各種プロジェクト完成に側面から技術的な貢献をしてきた。

高磁界特性が良いにもかかわらず、材質的なもろさのために実用的でなかったNb<sub>3</sub>Sn超電導線も、ブロンズ法によって極細多心化することが可能となり、静水圧押し出しによる工業的な製造が行なわれている。また、Nb-Ti合金の高磁界での臨界電流値を上昇させる最適処理条件が確立でき、8 Tで $1.1 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$ 以上の臨界電流密度が得られている。

本稿では、これら日立の超電導線の現状と展望について概説する。

### 2 超電導線の静水圧押し出し

超電導線の製造は、これまで種々検討され、熱間押し出し又は銅パイプと超電導合金を組み合わせる冷間引抜きする、いわゆる共引き法が一般的であった。複合材を製造するのに、より信頼性の高い方法として静水圧押し出し法<sup>2), 3)</sup>の有用性が示唆されており、実験室的研究が行なわれていたが、工業的規模での検討はまだその例を聞かない。日立電線株式会社は、世界で初めて静水圧押し出しを超電導線製造に応用し、実用化した<sup>4)~6)</sup>。

静水圧押し出しは、ビレットがヒマシ油などの圧媒中に保持されるため、コンテナ摩擦がないこと、ダイス潤滑が非常に良好であることなどの原理的特長から、これを超電導線製造

に応用した場合、次のような効果がある。すなわち、(1)押し出し中のメタルフローが均一であるため、長手方向及び横断面に関しビレットと相似構成の一定品質の押し出し材が得られる。複雑かつ精巧な複合構造をもっている超電導線の場合特に有利である。(2)比較的低温での押し出し加工が可能であり、構成材相互の反応の危険性、熱影響が少ない。したがって、熱間

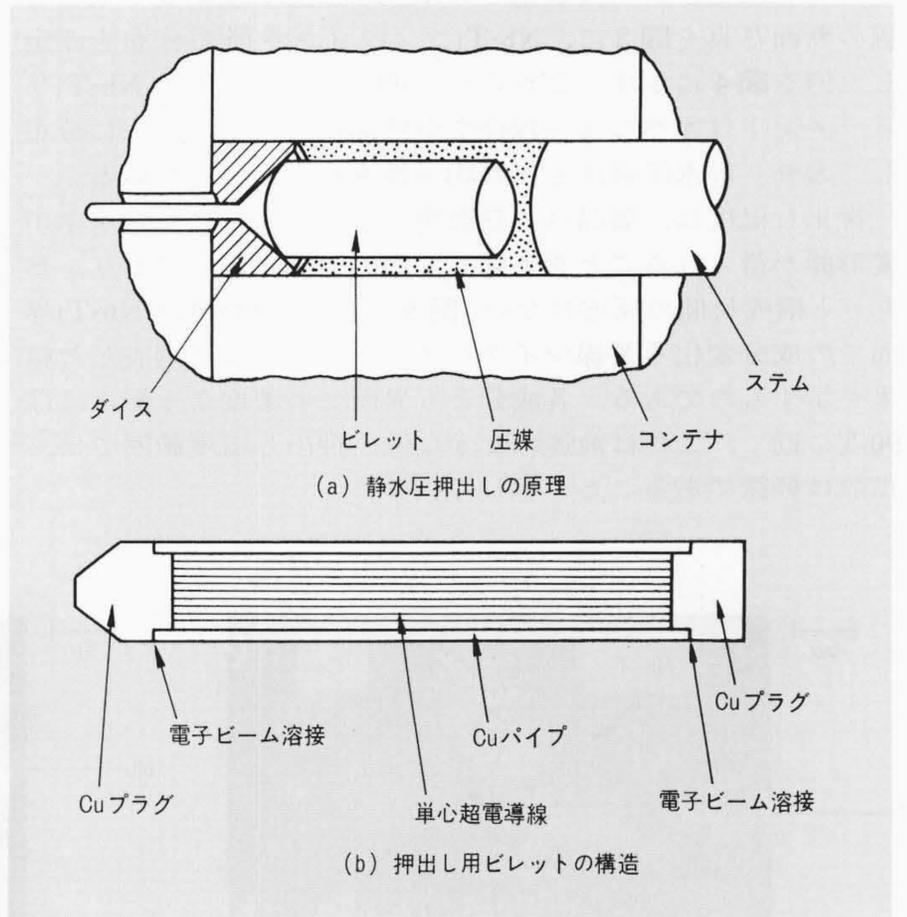


図1 静水圧押し出しの原理と押し出し用ビレットの構造 静水圧押し出しは、ビレットが圧媒中に保持されるためコンテナ摩擦がなく、均一な押し出し材が得られる。また、押し出し用ビレットは真空脱気した後、電子ビーム溶接されるので単心超電導線同士、及びCuパイプ間の密着性が良い。

\* 日立電線株式会社金属研究所 \*\* 日立製作所日立研究所

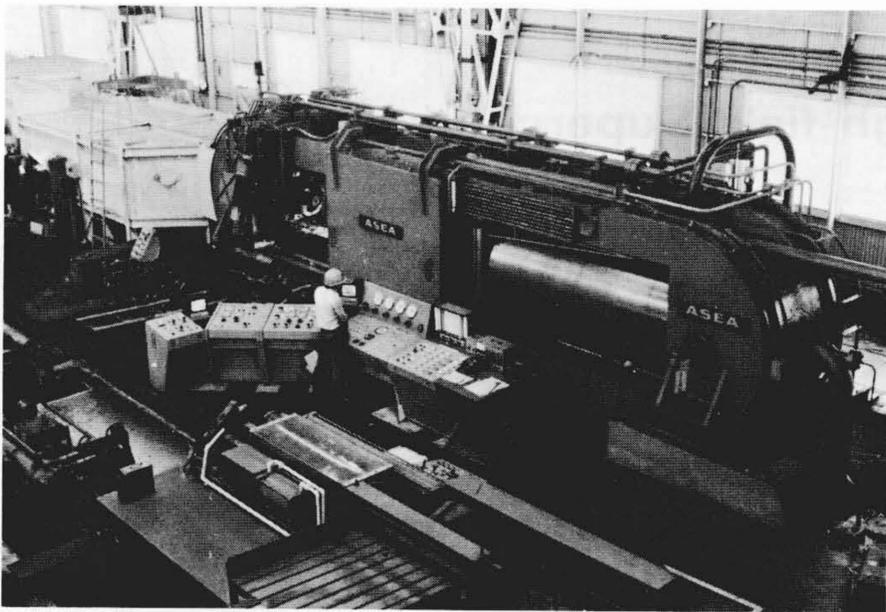


図2 4,000t静水圧押し機の外観 押し機は力量4,000tのASEA社製のもので、最高圧力14,000kg/cm<sup>2</sup>である。Nb-Ti, Nb<sub>3</sub>Sn超電導線のシングル線とマルチ線を、200~400℃で押し出す。

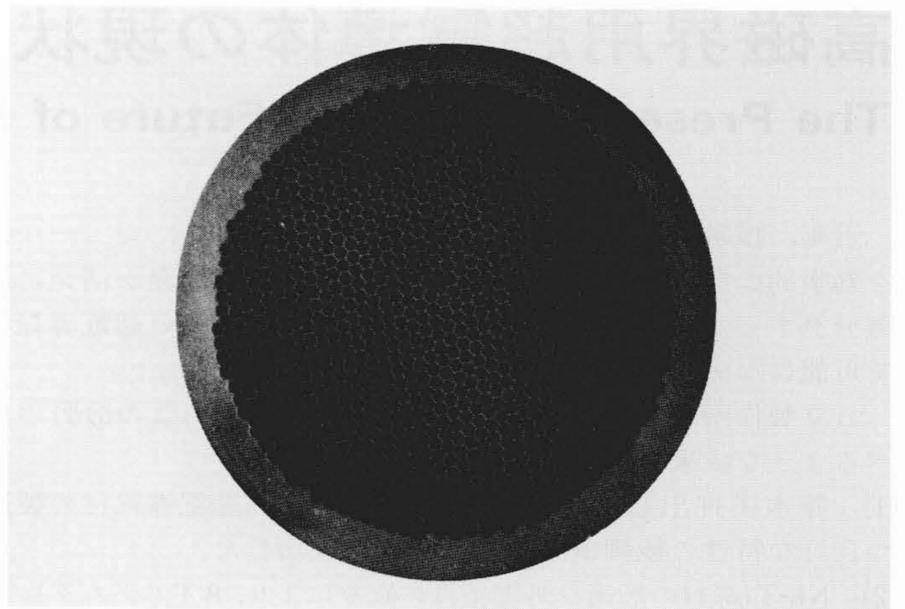


図3 静水圧押しによるNb-Ti超電導線断面写真 直径40mmのCuマトリックスの中に、直径0.86mmのNb-Tiフィラメントが1,090本、整然と配列されている。CuとNb-Tiの断面積比は1である。

ぜい性を起こしやすいブロンズマトリックスのNb<sub>3</sub>Sn線材の製造に適している。(3)長尺ピレットの使用が可能であり、品質の均一化とあいまって材料歩どまりが向上する。

図1に、静水圧押しの実験図と多心線押し用ピレットの構造を示す。ピレットは大径銅管にあらかじめ用意した六角形の単心超電導線を所要本数(例:千数百本)整列充填させ、次に管内を真空脱気した後、両端の銅プラグを電子ビーム溶接でシールする。

押し装置は力量4,000tのASEA社製静水圧プレスで、最高圧力14,000kg/cm<sup>2</sup>である。押し機の外観を図2に示す。静水圧押しによって製造したNb-Ti合金系極細多心超電導線の断面写真を図3に、Nb-Tiフィラメント径の分布を測定した例を図4に示す。これらから明らかなように、Nb-Tiフィラメントはすべて同一線径で全断面にわたって均一に分布しており、静水圧押し材の均一性を如実に示している。

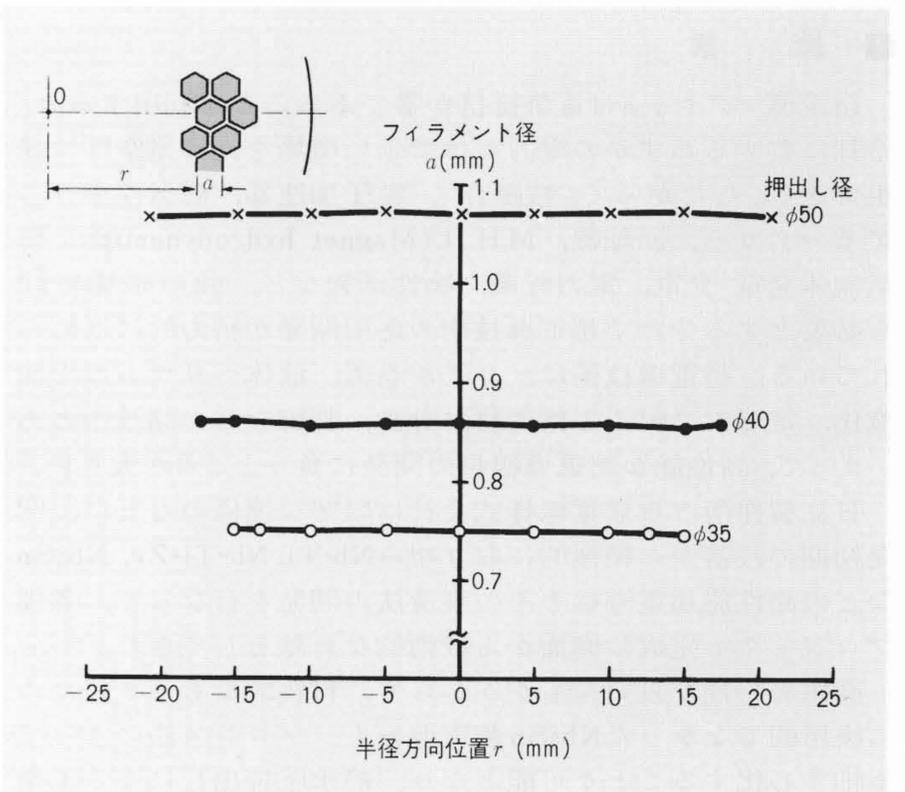


図4 静水圧押し材のNb-Tiフィラメント径分布 Nb-Ti超電導押し材の横断面で半径方向の各位置のフィラメントの径(六角形の対辺距離)は、全断面にわたり、ほぼ一定の分布をしており、均一変形していることが分かる。

押し温度は、製品への熱影響が小さく同時に一定水準の変形能が得られることを考慮して200~400℃としており、ピレット構成材間の反応はない。図5は押し材のCu/Nb-Ti界面での成分変化をX線マイクロアナライザにより調査した結果を示すものである。各成分とも界面での濃度こう配はほぼ90度に近く、これは前述のような低い押し温度範囲では、拡散は軽微であることを示している。

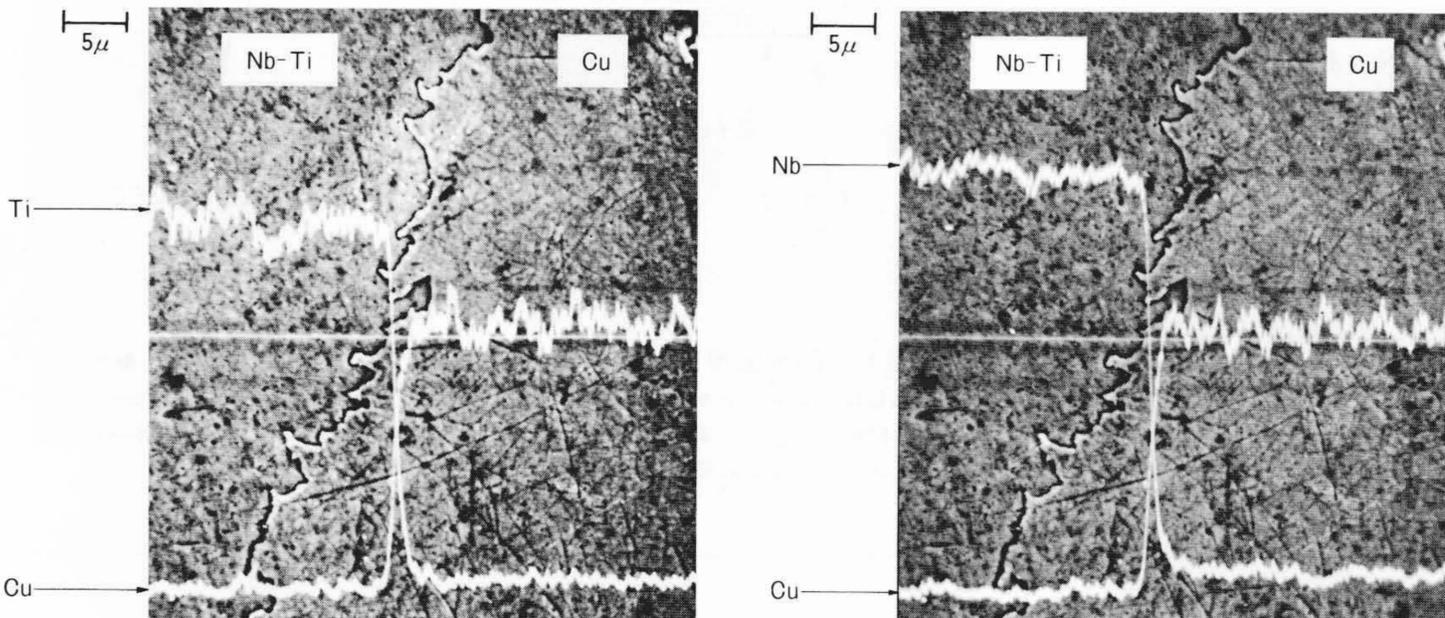


図5 静水圧押し材のCu/Nb-Ti界面のX線マイクロアナライザプロフィール 静水圧押し法は押し温度が低いため、CuとNb-Ti界面での拡散は軽微である。

### 3 安定化用無酸素銅

超電導線はNb-TiやNb<sub>3</sub>Snなどの超電導線材をそのまま用いることはなく、安定化材として高純度な銅やアルミニウムなどを被覆して用いる。安定化材の役割は、(1)常電導部が局部的に生じた場合、電流をバイパスさせてジュール熱の発生を防ぐ、(2)安定化材の良好な熱伝導性によって、フラックスジャンプに起因する発熱を速やかに冷却して常電導部の伝搬を防ぐ、(3)磁束の急激な変化を安定化材中に流れるうず電流で抑えることである。したがって、電気抵抗が小さく、熱伝導性の良い材料であることが必要である。日立電線株式会社は、OFC(Oxygen-Free Copper:無酸素銅)を全連続鑄造法で製作しており、安定化用銅材として超電導線製造に用いている。

OFCの純度は、表1に示したように99.99%以上の銅で、非常に加工性が良く、超電導用OFCの焼鈍材の残留抵抗は $0.5 \times 10^{-8} \Omega \text{cm}$ 、残留抵抗比は300以上である。銅の電気抵抗は冷間加工度によっても異なり、また磁界が加わると増加する。冷間加工度を変えた場合の磁界と電気抵抗との関係を図6に示す。銅は適当な冷間加工度を加えることによって、電磁氣的安定化材としての役割と機械的な強度メンバとしての役割を同時にもたせることができる<sup>7)</sup>。

### 4 Nb<sub>3</sub>Sn超電導線

高磁界用超電導材としてNb<sub>3</sub>Snは古くから注目されてきたが、金属間化合物であるため非常にもろく、従来はその製法からくる制約のためテープとしてだけに製作されてきたが、コイル形状に大きな制約があること、磁場異方性があることなどの理由でその使用は小形コイルに限られていた。近年

表1 日立無酸素銅(OFC)の代表成分 連続鑄造方式で製造するため、品質が均一で焼鈍材の残留抵抗値は $0.5 \times 10^{-8} \Omega \text{cm}$ 、抵抗比(RRR:Residual Resistance Ratio)は300以上である。

| 元 素        | 含有量 (%)  |
|------------|----------|
| 銅 (Cu)     | 99.99以上  |
| 酸 素 (O)    | 0.001以下  |
| リン (P)     | 0.0003以下 |
| 硫 黄 (S)    | 0.0018以下 |
| カドミウム (Cd) | 0.0001以下 |
| 亜 鉛 (Zn)   | 0.0001以下 |
| 水 銀 (Hg)   | 0.0001以下 |
| 鉛 (Pb)     | 0.001以下  |
| セ レ ン (Se) | 0.001以下  |
| テ ル ル (Te) | 0.001以下  |
| ビスマス (Bi)  | 0.001以下  |

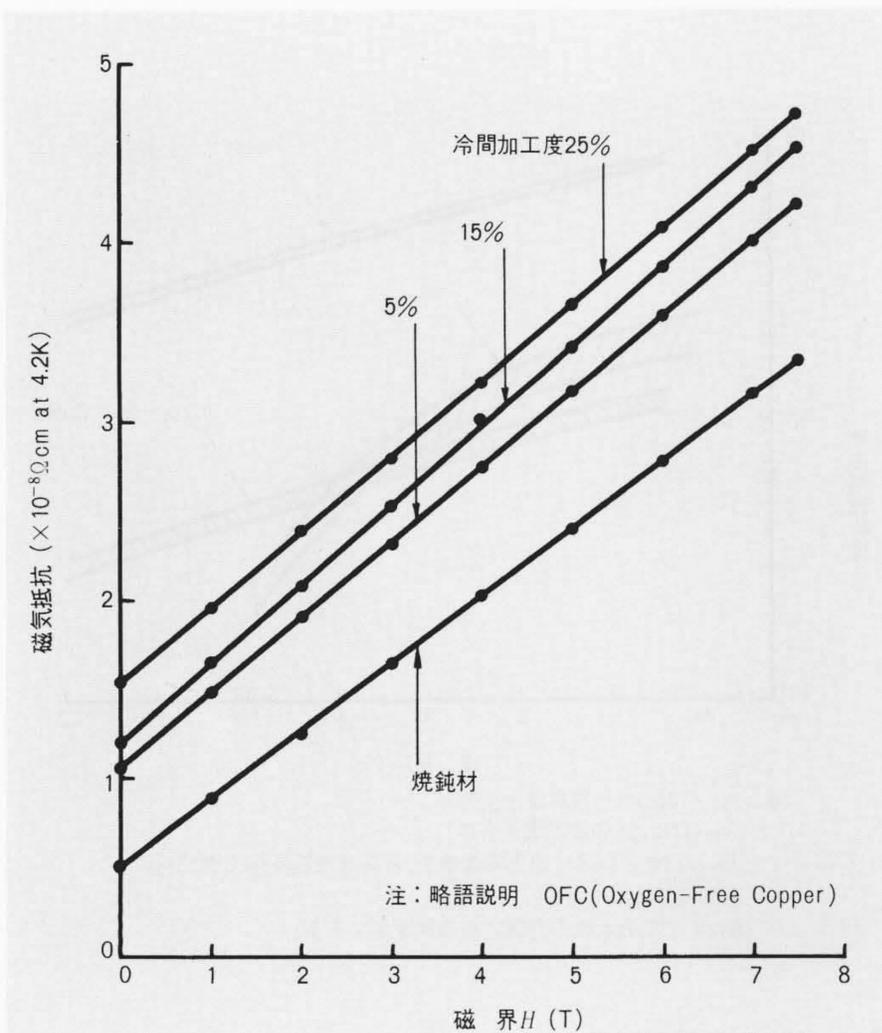


図6 OFCの冷間加工度と磁気抵抗の関係 99.99%Cuの純度をもつOFCは、磁気抵抗が低いため超電導線の安定化材として用いられている。

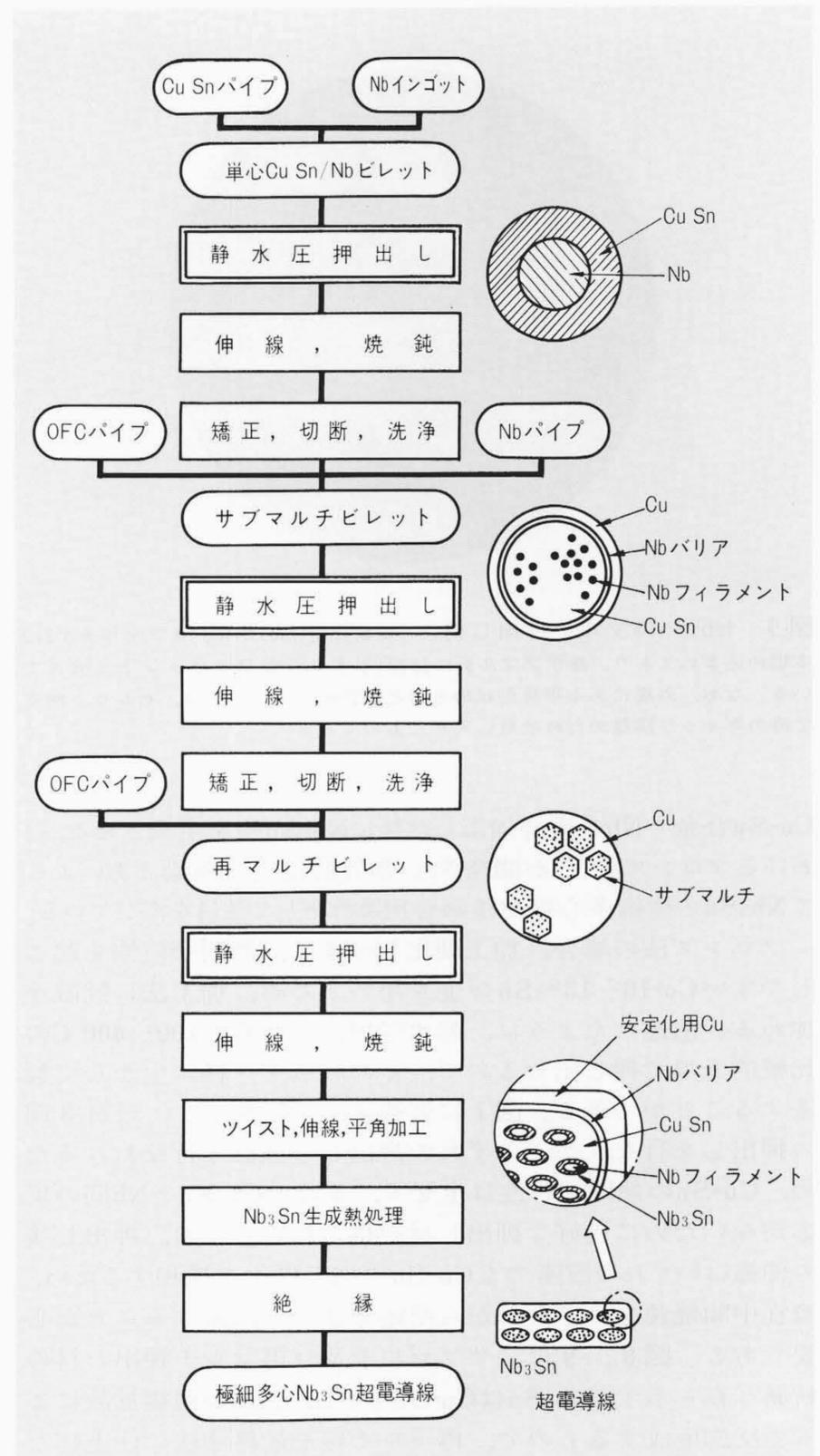


図7 Nb<sub>3</sub>Sn超電導線の製造工程 静水圧押し出し法により、導体構成材同士が反応しない比較的低温で加工でき、均一かつ良好な特性の超電導線が得られる。

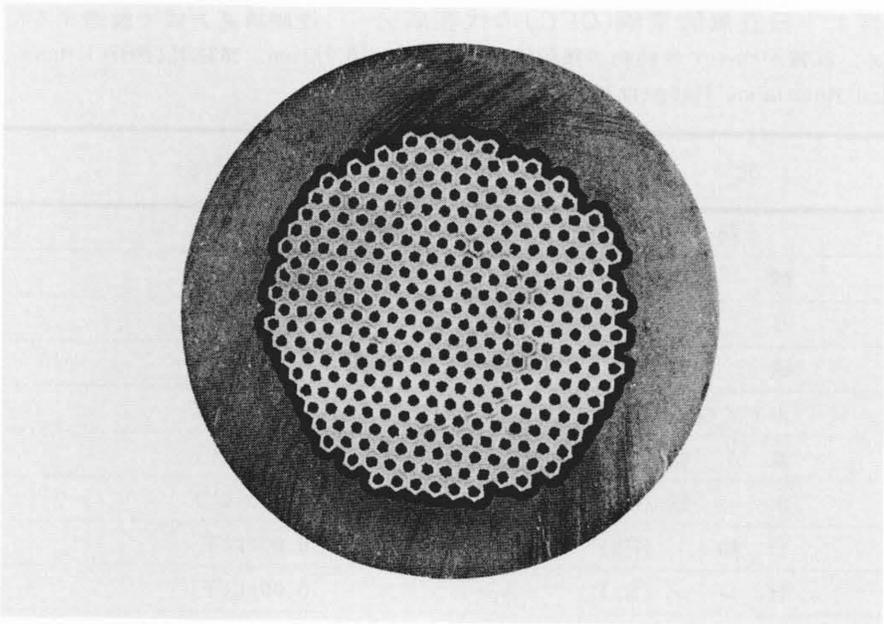


図8 Nb<sub>3</sub>Snサブマルチ押し材 最外層のCuの内側にNbバリアが拡散障壁として入れてある。直径40mmで各構成材の断面積比はCu:Cu-Sn:Nb=3:2:1である。

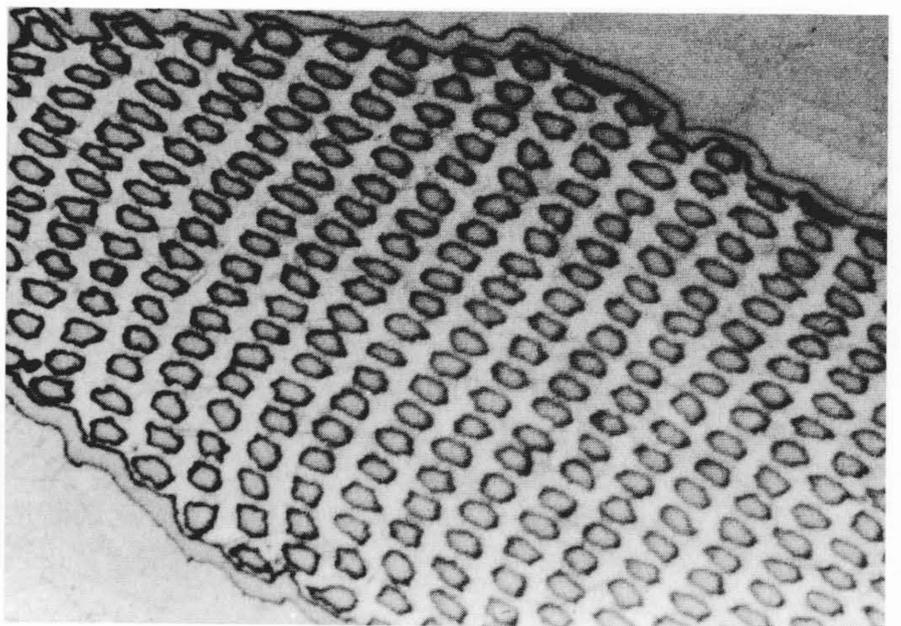


図10 平角加工したNb<sub>3</sub>Sn超電導線の断面の一部 直径約5μmのNbフィラメント表面にNb<sub>3</sub>Sn層が生成しており、NbバリアはCuSnとCuとの界面を障壁として隔てている。

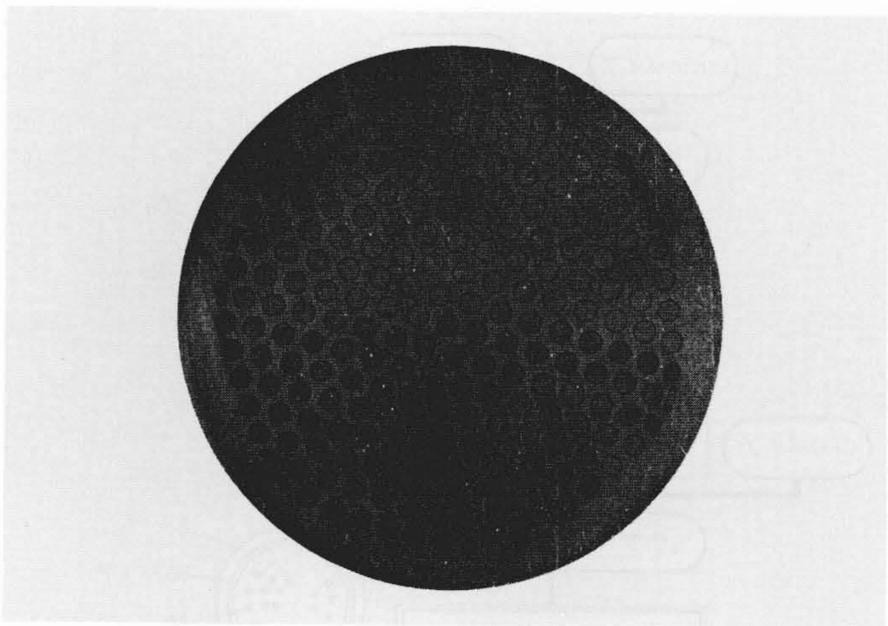


図9 Nb<sub>3</sub>Sn再マルチ押し材 安定化用Cuの中に、サブマルチが213本埋め込まれており、各サブマルチには331本ずつのNbフィラメントを含んでいる。なお、外層にある平角形状のものと細径のサブマルチは、ビレット組立て時のギャップ調整のため故意に入れたものである。

Cu-Sn合金とNbを複合加工した後にNb<sub>3</sub>Sn相を生成させる、いわゆるブロンズ法<sup>8),9)</sup>が開発され、本質的安定化理論とあいまってNb<sub>3</sub>Snの極細多心線が核融合用導体として注目を浴びている。

ブロンズ法の場合、加工硬化しやすく、熱間ぜい性を起こしやすいCu-10~13%Sn合金を用いるため、加工法に制限が加わる。前述したように、静水圧押し出しの場合200~400°Cの比較的低温で押し出せるので、その利点を一杯に生かして製造することができる。図7に製造法の一例を示す。合計3回の押し出しを行なうが、いずれの押し出しも低温で行なわれるため、Cu-Snの熱間ぜい性は生ぜず、また、Cu-SnとNb間の反応がないために良好な押し出し材が得られる。なお、押し出し後の伸線はいずれの段階でもCu-Snの加工硬化を緩和するため、適宜中間焼鈍をはさみながら所定寸法まで減面することが必要である。図8, 9に、サブマルチ及び再マルチ押し材の断面写真を示す。Nb<sub>3</sub>SnはCu-Sn中のSnとNbが固相拡散によって反応生成するもので、再マルチ線を最終寸法に仕上げた後にNb<sub>3</sub>Sn生成熱処理を行ない、直径約5μmのNbフィラメント表面に0.6~1μm厚さに生成させる。図10に平角加工したNb<sub>3</sub>Sn超電導線断面の一部を示す。なお、サブマルチビレッ

ト組立て時に挿入したNbパイプはOFC中にSnが混入しないように拡散障壁<sup>10)</sup>(バリア)の目的で用いられるものであり、OFCの純度が保たれるため安定化材としての機能が損なわれることがない。本方式で製造したNb<sub>3</sub>Sn極細多心超電導線の代表的な特性を、Nb-Ti線材とともに図11に示す。

### 5 合金系超電導線

Nb-Ti, Nb-Ti-Zrなどの合金系超電導材は加工性が良く、極細多心化が容易でコイル巻線時の取扱いも非常に容易であるため、実用超電導線として最もよく使用されている。その断面形状もコイル巻線作業、コイル電流密度など設計上の要請から種々である。例として図12に銅を中心にしてより合わ

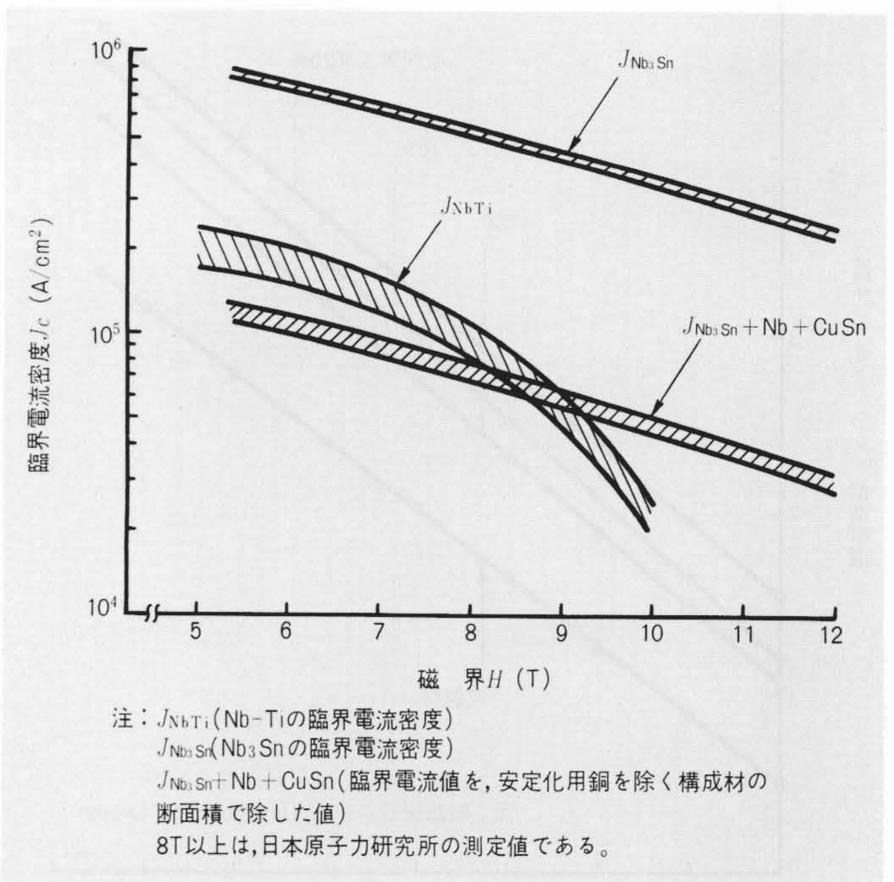


図11 Nb-Ti超電導線及びNb<sub>3</sub>Sn超電導線の磁場-臨界電流密度特性 Nb<sub>3</sub>Snそのものの臨界電流密度は高いが( $J_{Nb_3Sn}$ の曲線)、実用的な値は桁近く低くなる ( $J_{Nb_3Sn+ Nb+ CuSn}$ の曲線)。したがって、8T以下の磁場ではNb-Ti、8T以上ではNb<sub>3</sub>Snが使用される。

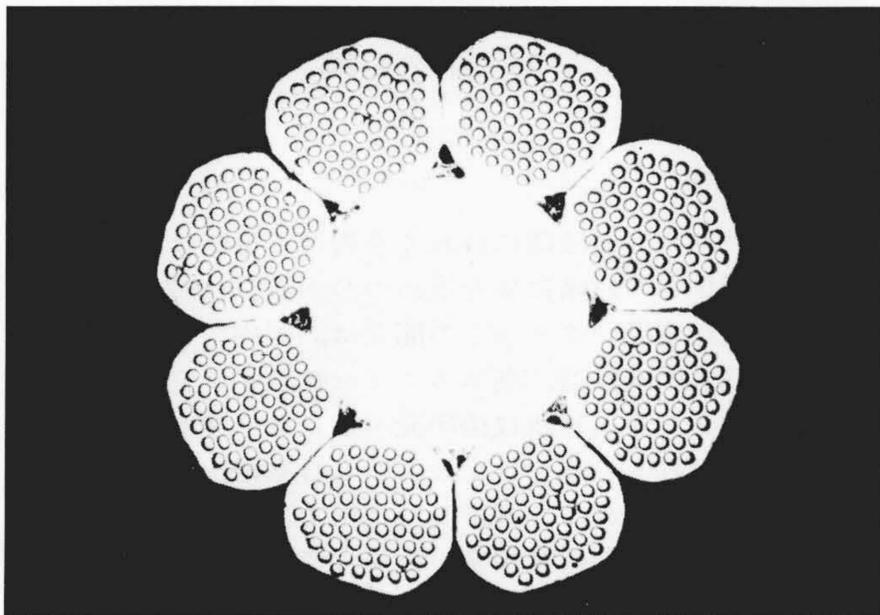


図12 より合せ超電導線 Cuを中心にして、その周りに多心超電導線をより合わせて、たわみ性をもたせた線材の例を示す(外径:2.25mm, Cu/SC比:3, Nb-Ti-Zrフィラメント:直径 $50\mu\text{m}$ ×488本, 電流容量:1,900A at 5T)。

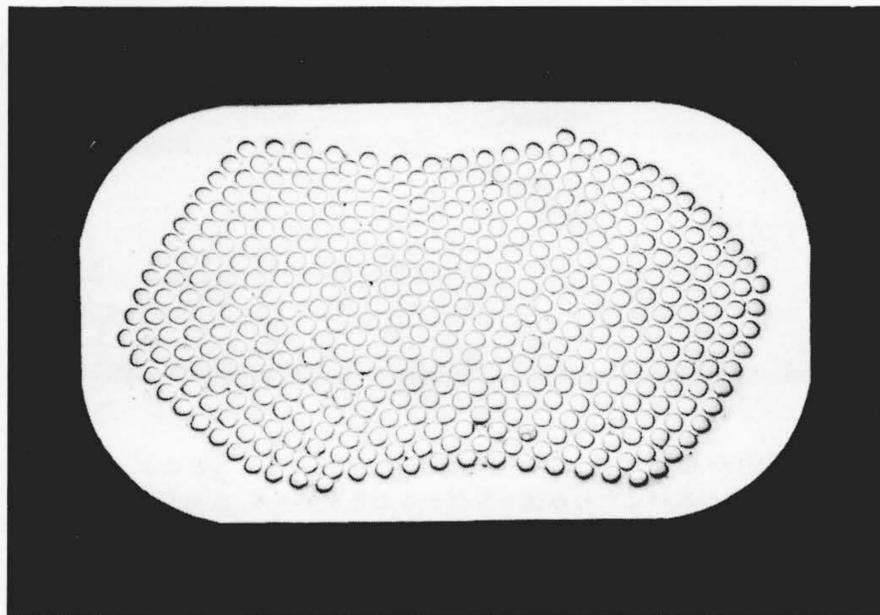


図13 平角超電導線 コイルの巻線密度を上げるとともに、励磁中の線材の動きを小さくするために平角形状にし密巻きされる(寸法:1.0mm×1.7mm, Cu/SC比:2, Nb-Ti-Zrフィラメント:直径 $41\mu\text{m}$ ×397本, 電流容量:950A at 5T)。

せたわみ性をもたせた線と、図13に巻線密度を上げるため平角化した線の断面を示す。

一般に超電導線は直流で用いられることが多いが、加速器などのパルスマグネットとして用いる場合は、変化磁界によって誘起される安定化銅中のうず電流及びフィラメント間の結合電流をしゃ断し、交流損失を小さくする必要がある。そのため、安定化銅をキュプロニッケル(Cu-Ni)などの高抵抗層で分割したり、超電導線を編組みする方法がとられる。図14にCu-Niで安定化銅を分割した、いわゆる三層構造線材の例を示す。超電導フィラメントは1本ずつ銅とCu-Niで囲まれており、線材中央部の銅もまたCu-Niで細分されている。次に直径 $0.15\text{mm}$ (Cu/SC比=1.5, Nb-Ti-Zrフィラメント=直径 $5\mu\text{m}$ ×331本入り)を120本編組みした線材の例を図15に示す。このような導体構造にすることによって、図16に示すように、同等のモノリシック線材と比べて交流損失は約 $\frac{1}{3}$ に減少させることができる<sup>11)</sup>。編組みやより線構造にすることによる利点は、巻線作業上重要なたわみ性をもたせられ、編組み又はより合わせ本数を増やすことによって大電流容量化が容易に達成できるほか、単位線が細いため長尺線が得られやすいなどが挙げられる。

一方、合金系線材は従来5~6T以下の磁界で使われることが多かったが、核融合用などマグネットの高磁界化に伴って高磁界特性の改良が望まれていた。その要望にこたえて、加工条件と時効熱処理条件の最適化により、前出図11に示すように極めて良好な特性をもったNb-Ti合金線材を開発した。同図中の特性バンドは処理条件による差で、同一処理によるばらつきを示すものではなく、適切な処理条件では8Tで $1.1 \times 10^5 \text{A/cm}^2$ 以上の高い臨界電流密度が得られている。合金系線材もその製造は $\text{Nb}_3\text{Sn}$ と同様、単心線、多心線共に静水圧押し出しを基点としており、基本的な工程はほぼ同じである。

また線材の軽量化、磁気抵抗効果の面から、アルミニウムを安定化材にした線材はアルミニウムの変形抵抗が小さいため加工が困難であったが、日立電線株式会社は新しい製造法を開発し、製造に成功している。

## 6 今後の開発方向

超電導応用分野の開発が進むにつれ、超電導線材には、今後更に高度な特性が要求されるようになる。これらの要求に

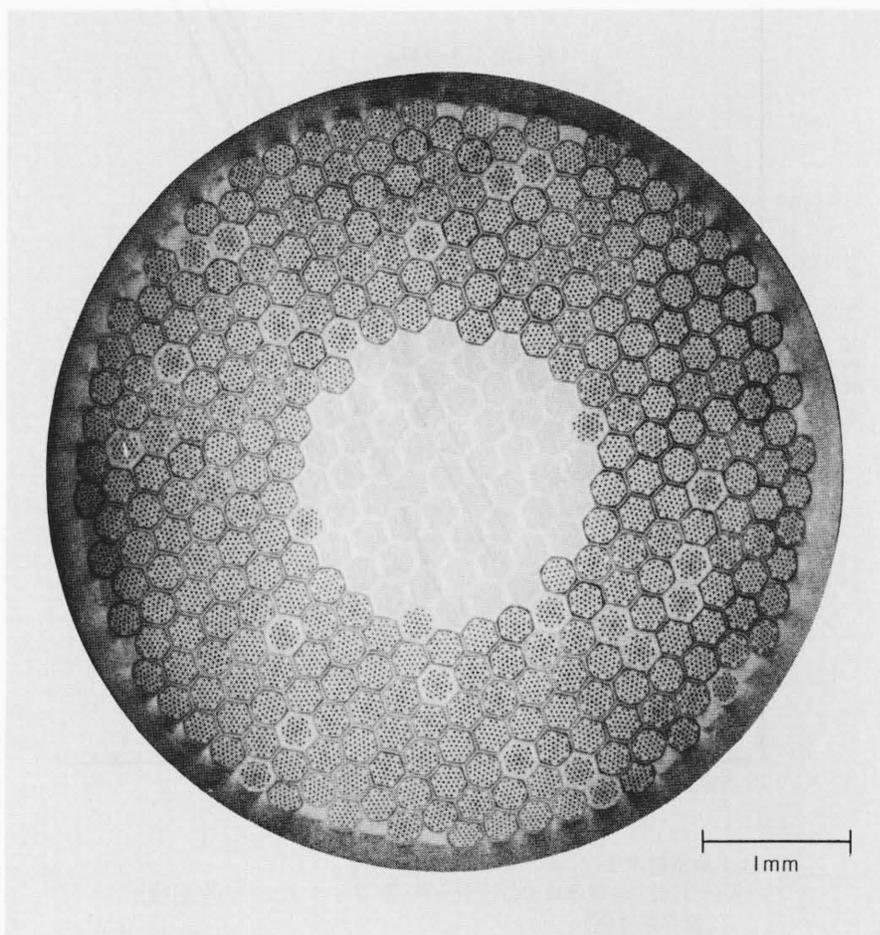


図14 三層構造導体 パルスマグネット用超電導導体として製作したもので、電流、結合電流による交流損失を小さくするため、Cu-Niなどによって隔壁を設けてある。CuとCu-Niを被覆した直径 $20\mu\text{m}$ のNb-Tiフィラメントが9,486本周辺部に配置され、中央部にはCu-Niで分割されたCuが組み込まれている。電流容量は2,000A at 8Tである。

対処するためには、多くの開発検討を早急に行なわなければならない。

### (1) 高磁界化

$\text{Nb}_3\text{Sn}$ に第3元素を添加して高磁界特性を改良する試み<sup>12)~14)</sup>など検討が盛んであり、核融合などの目的のため開発が必要である。

### (2) 大電流容量化

核融合用には十キロアンペア~数十キロアンペアの大容量導体が必要とされる。大容量化に伴って機械的強度、導体表面処理による冷却特性の改良などの<sup>15),16)</sup>開発要素が多い。

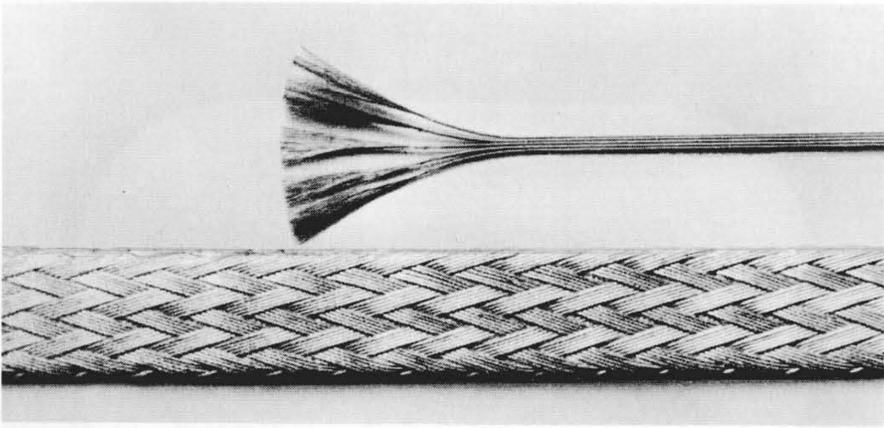


図15 編組み超電導線 細い超電導線を編組みすることによって交流損失を減らし、かつ線材にたわみ性をもたせることができる。直径0.15mm(Cu/SC比:1.5, Nb-Ti-Zrフィラメント:直径5 $\mu$ m $\times$ 331本)の素線を5本並列にはんだ付けした後にこれを24組み編組みして0.7mm $\times$ 6.4mmの寸法にしてある。電流容量は1,800A at 5Tである。

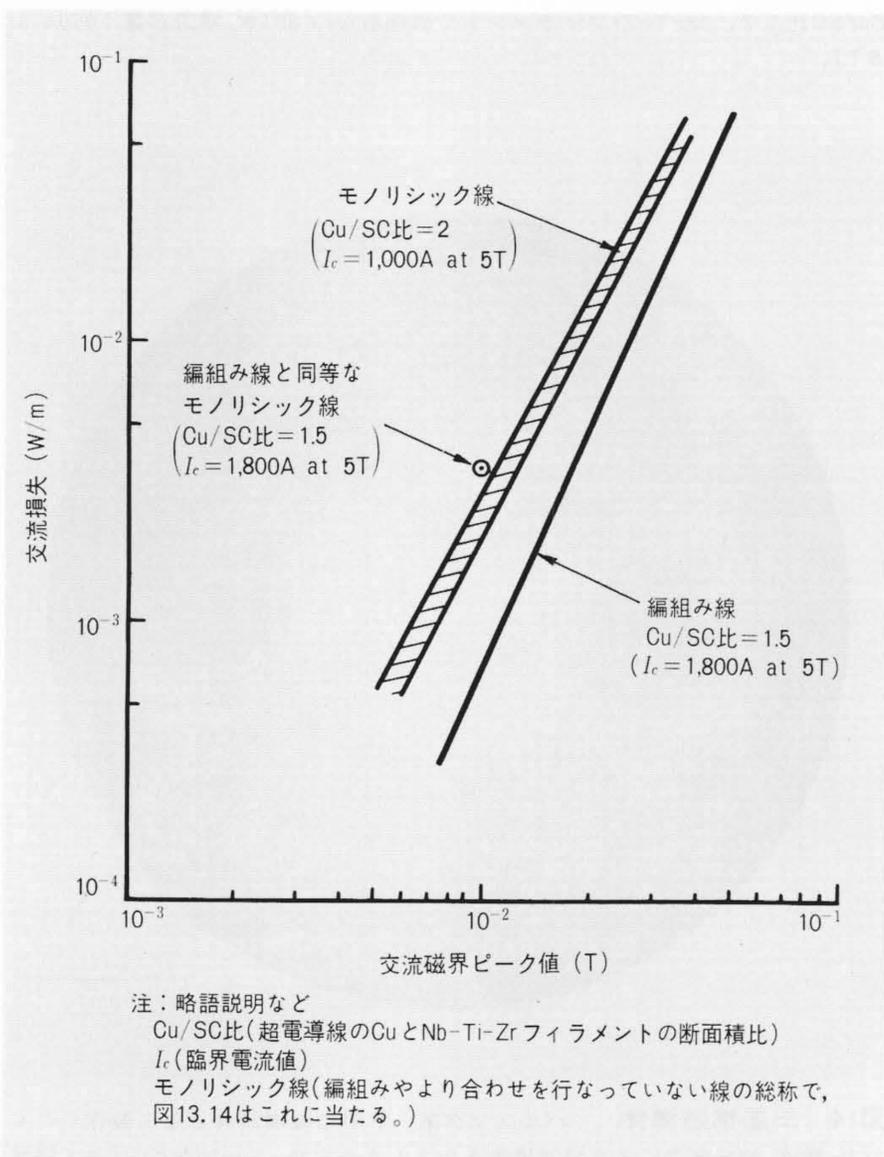


図16 編組み線とモノリシック線の交流損失 編組み線とモノリシック線との交流損失の比較を示した。モノリシック線はCu/SC比が2で、1,000A at 5Tの線材の実測値を、 $\odot$ 印は編組み線の性能をそのままにしてモノリシック線に構成し直したときの計算値である。損失はモノリシック線に比べて約半に低下することが分かる。

(3) 耐ひずみ特性

Nb<sub>3</sub>Sn線材実用化の大きな障害となっているひずみ劣化のない線材の開発が必要であり、新しい試みとしてInsitu法の開発などが挙げられる。

(4) 低交流損失

加速器など変化磁界で用いられる線材に対し、三層構造、より線、編組み線などの開発を要する。

(5) 製造技術

高度な複合線材としての超電導線の加工技術、例えば押出

し、伸線、より線、はんだ付けなどの異種材料との複合法の開発を行ない、あらゆる線材の需要に対応できる技術の蓄積が必要である。

7 結 言

超電導技術は開発段階に終わりを告げ、近年ようやく実験室から実用化への段階に歩を進めつつある。核融合をはじめとする各種超電導マグネットの開発は、国内では日本原子力研究所、日本国有鉄道、高エネルギー物理学研究所、電子技術総合研究所、金属材料技術研究所及び各大学が中心となり活発に進められている。日立製作所と日立電線株式会社は、メーカーとしてこれまで蓄積した技術を基盤に、上記各政府研究機関と協力して研究開発を行なってゆく予定である。

本論文中の超電導線の高磁界特性は、日本原子力研究所・核融合研究部超電導磁石研究室で測定されたものであり、同研究室の許可を得てここに発表させていただいた。

参考文献

- 1) 木村, 外: 超電導マグネットの核融合への技術開発, 日立評論, 62, 381~386 (昭55-5)
- 2) G.E. Meyer, et al.: Hydrostatic Extrusion of Nb<sub>3</sub>Sn and NbTi Multifilamentary Superconducting Wire, Int. Conf. Manuf. Supercond Mater. (USA) 59~73 (1977)
- 3) J. Brems, et al.: Einfluss eines hydrostatischen Strangpressens auf die supraleitenden Eigenschaften von Zinnbronze/Niob-Vielkernleitern, Metall. 33, 6, 597~601 (1979)
- 4) 参木, 外: 静水圧押出しによる超電導複合体の製造, 第30回塑性加工連合講演会予稿集, 251~255 (1979-11)
- 5) 清藤, 外: 静水圧押出しにおける超電導複合体の押出圧力, 第30回塑性加工連合講演会予稿集, 256~259 (1979-11)
- 6) 森合, 外: 高液圧押出し法による超電導線の製造, 第24回低温工学研究発表会予稿集, 54 (昭55-5)
- 7) 多田, 外: 冷間加工した大型導体安定化銅の磁気抵抗効果, 第25回低温工学研究発表会予稿集, 50 (昭55-12)
- 8) M. Suenaga, et al.: Effects of Sn Concentration on the Critical Current Density of Nb<sub>3</sub>Sn Formed at the Nb-(CuSn alloy) Interface. App. Phys. Lett. 25, 10, 624~627 (1974)
- 9) E. Adam, et al.: Further Developments in Stabilized Multi-filamentary Nb<sub>3</sub>Sn Superconductors, IEEE Trans. MAG-13, 319~322 (1977)
- 10) 多田, 外: 大容量Nb<sub>3</sub>Sn超電導体の比較評価試験, 第20回低温工学研究発表会予稿集, 54 (昭53-5)
- 11) 森合, 外: 超電導編組み線の開発, 第18回低温工学研究発表会予稿集, 12 (昭52-5)
- 12) 浅野, 外: 複合加工Nb<sub>3</sub>Sn超電導線材に対するIVa族元素添加の効果, 第25回低温工学研究発表会予稿集, 6 (昭55-12)
- 13) H. Sekine, et al.: Studies on the Composite Processed Nb-Hf/Cu-Sn-Ga High-field Superconductors, App. Super. Conf. Preprint (1980-9)
- 14) 相原, 外: ブロンズ法で作製した(NbTa)<sub>3</sub>Sn線の超電導特性, 第23回低温工学研究発表会予稿集, 11 (昭54-11)
- 15) 中山, 外: 高性能伝熱面「サーモエクスセル」, 日立評論 57, 637~640 (昭50-8)
- 16) 西, 外: 大電流超電導導体のヒートフラックス(II), 第22回低温工学研究発表会予稿集, 21(昭54-6)及び西, 外: 大電流超電導導体のヒートフラックス(III), 第23回低温工学研究発表会予稿集, 63 (昭54-11)