U.D.C. 621.315.55:538.945

金属系超電導導体の開発

Development of Metallic Superconductors

日立グループでの超電導導体の開発は1960年代に始まり，これまで材料の研究から製品に至るまで一連の研究開発に注力し，国家的なプロジェクトに対応してきた。特有の技術としては，極低温用無酸素銅量産技術，静水圧押出法，前方張力付加押出法によるアルミニウム安定化導体の製造技術，高性能伝熱面の形成技術などが挙げられる。さらに，高磁界での特性に優れた$(NbTi)_3Sn$極細多心線や核融合用強制冷却型導体，超大型加速器SSC(Superconducting Super Collider)用導体，交流機器用導体などの開発を行っている。

石上祐治* Yûji Ishigami
森合英純** Hidezumi Moriai
多田直文*** Naofumi Tada
酒井修二**** Shûji Sakai
鎌田圀尚***** Kunihisa Kamata
清藤雅宏***** Masahiro Seidô

1 緒　言

現在各方面で実用化されている金属系超電導体は特性向上，応用面での研究開発が着実に進展している。すなわち，核融合，粒子加速器，磁気浮上，超電導発電機，物性研究などの分野で，臨界電流密度の向上，大容量化，低交流損失化，安定性の向上などが常に要求されており，それらにこたえるための技術開発が行われている。この機会に金属系超電導体に関して，長い年月にわたって蓄積してきた技術を整理，紹介するとともに，開発の現状，将来展望などについて述べる。

2 開発の経緯

日立グループでの金属系超電導線の開発の歴史は，1960年代の初期に日立製作所中央研究所で超電導材料の基礎研究に着手したときに始まる。その後1966年に通商産業省の大型プロジェクト制度が発足し，MHD(Magnethydrodynamics)発電研究が取り上げられたのが契機となり，超電導線材の開発研究が本格的に行われるようになった。最初に半工業的規模で製造した線材は，日立製作所中央研究所で開発したNb-40Zr-10Ti合金(x合金)を日立電線株式会社独自の横圧延埋込法で線材化したもので，MHD発電研究での4.5 Tくら形電磁石の完成に貢献した。以後，現在に至るまで二十余年間，素材から製品に至るまで種々の要素技術を蓄積し，数多くの実績を残してきた。その間の主な技術開発の状況と適用したプロジェクトを**表1**に示す。

1970年代に入ると，合金系超電導材料の主流はNb-Zr系からNb-Ti系に移行した。Nb-Ti系合金は銅と複合して伸線加工することができたため，現在の極細多心線技術につながることになった。当時の実績としては，第一期MHD発電研究の最終段階となった1 MW MHD発電装置での世界最大級の電磁石，および日本国有鉄道100周年記念として公開された磁気浮上式リニアモータカーの浮上・推進用電磁石に線材を供給したことが挙げられる。前者は完全安定化導体，後者は極細多心線で，それぞれの特長が実用規模の電磁石で実証された点で意義が深い。以後，核融合，加速器，医用，エネルギー貯蔵など広い分野の多くの装置のための導体が開発され，実用されている。

1970年代の中期になると，核融合研究や物性研究の分野で高磁界電磁石のニーズが高まってきたので，化合物系線材の開発研究に着手した。内部拡散法を含む種々な方法について検討した結果，製造技術上およびひずみ特性上もっとも信頼性のおける極細多心線製造法として，ブロンズ法を採用した。当時製作した日立製作所日立研究所の10 T級化合物電磁石は，Nb_3Sn極細多心線を用いた電磁石としては先駆的なものであり，その後の各種プロジェクトの実現につながった。

線材の製造技術についても着実に技術の蓄積を重ねてきた。1970年代の後期には静水圧押出技術を導入し，世界で初めて工業化に成功することができた。また，大容量導体で完全安定化を達成するための手段として，高性能伝熱面の開発を行った。同時に，大容量複合導体の組立技術を確立した。さらに，前方張力付加押出法によるアルミニウム安定化導体の製造技術を確立した。

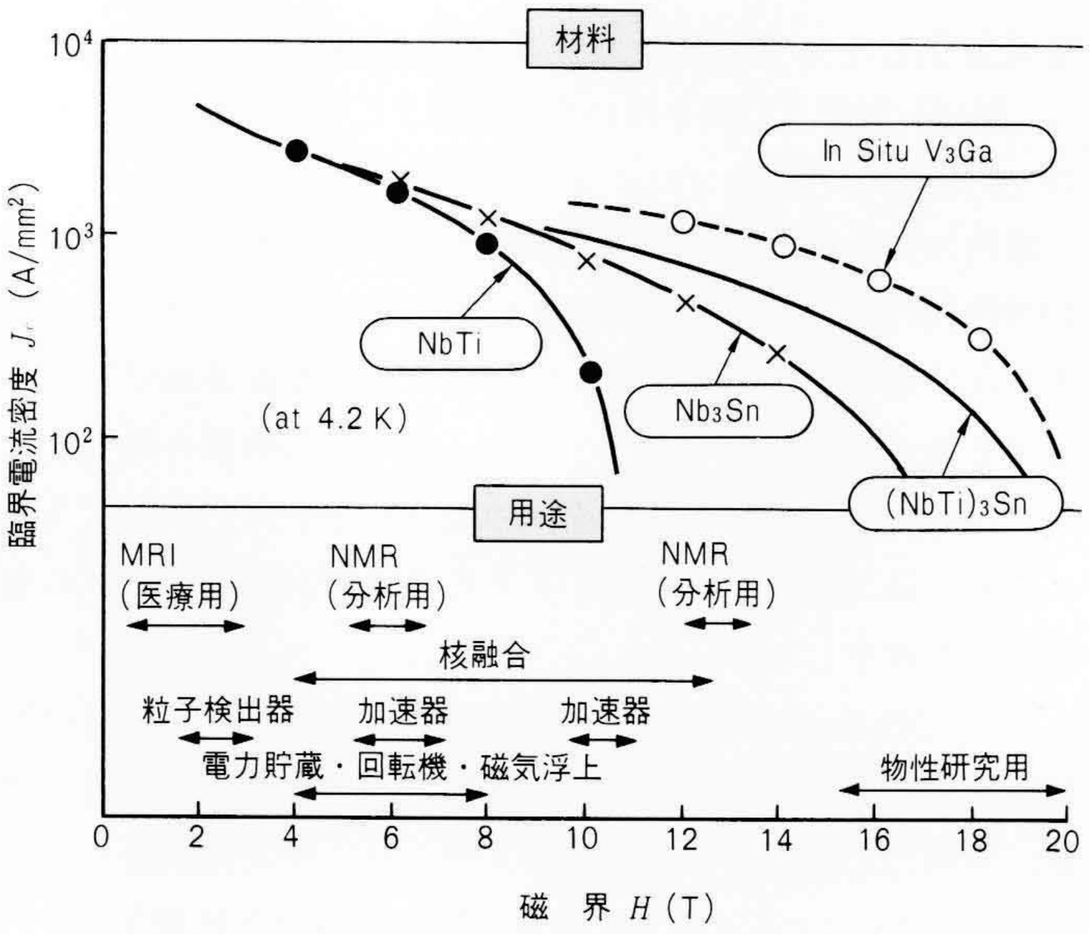
一方，Nb_3Sn線材の高磁界特性を向上させるため，金属材料技術研究所と共同研究を行い，$(Nb, Ti)_3Sn$化合物線材の開発，実用化に成功した。ブロンズマトリックスに適量のチタンを添加することによって，従来のNb_3Sn線材と比較すると，

* 日立電線株式会社超電導技術推進本部　** 日立電線株式会社土浦工場　*** 日立製作所日立研究所　**** 日立電線株式会社金属研究所
***** 日立電線株式会社金属研究所 工学博士

表1 日立グループでの超電導線材開発経過 二十余年にわたり独自の技術を蓄積し，各種プロジェクトに対応してきた。

年代（西暦年）	技術開発	適用プロジェクト
1968	●横圧延埋込法（X合金 Nb-40Zr-10Ti）	●「MHD発電」4.5Tくら形電磁石（電子技術総合研究所）（通商産業省大型プロジェクト）
1970	●共引き伸線技術（Z 合金 Nb-62，5Ti-2，5Zr）	●1MW MHD発電装置（電子技術総合研究所）
1972	●極細多心線製造技術 ●超電導同軸ケーブル ●液体窒素冷却極低温ケーブル	●日本国有鉄道100周年記念リニアモータカー（ML-100）
1974	●ブロンズ法によるNb_3Sn極細多心線製造技術	●10T級化合物電磁石（日立製作所日立研究所）
1978〜1982	●静水圧押出法 ●高性能伝熱面（サーモエクセル＋黒化処理） ●大容量複合導体製造技術	●日本国有鉄道・宮崎実験線リニアモータカー（ML-500），（MLU001） ●IEA-LCT電磁石（日本原子力研究所） ●TMC電磁石（日本原子力研究所）
1983	●EFT法によるアルミニウム安定化導体製造技術 ●$(Nb, Ti)_3Sn$ 導体開発（金属材料技術研究所と共同研究）	●核融合実験装置“TRIAM-1M”（九州大学） ●日米協力-CDF電磁石（筑波大学-フェルミ米国国立研究所） ●15T級電磁石（金属材料技術研究所，九州大学，日本原子力研究所，日立製作所日立研究所）
1984	●In Situ V_3Ga テープ製造技術 ●MRI用高銅比NbTi線材	●18T級電磁石（金属材料技術研究所） ●MRI用電磁石 ●Nb_3Sn強制冷却型導体（日本原子力研究所） ●VAMAS用線材
1985〜1986	●粒子加速器用成型より線 ●交流用サブミクロン線材	●四極電磁石（高エネルギー物理学研究所） ●SOR用電磁石 ●AMY用電磁石（高エネルギー物理学研究所）
1987〜	●加速器用成型より線の高性能化 ●大容量強制冷却型導体 ●超電導発電機用導体 ●軽量高安定化線材	●SMES ●SSC計画（U.S.A） ●原型トロイダルコイル計画（日本原子力研究所） ●大型ヘリカル装置（核融合科学研究所） ●ムーンライト計画 ●リニアモータカー

注：略語説明 EFT (Extrusion with Front Tension)
MRI (Magnetic Resonance Imaging)
CDF (Colliding beam Detector Facility)
VAMAS (Versailles Project on Advanced Materials and Standards)
SSC (Superconducting Super Collider)
SMES (Superconducting Magnet Energy Storage)



注：略語説明 NMR (Nuclear Magnetic Resonance)

図1 各種超電導線材の磁界-電流密度特性と用途 使用条件から要求される磁界が定まり，それに応じて超電導線材の材質が選定される。

15Tで2倍以上の臨界電流密度が得られるようになった。この成果は，金属材料技術研究所，日本原子力研究所，九州大学などの15T級高磁界電磁石に生かされている。またこの線材は，1982年のベルサイユサミット会議で決定された新材料標準化に関する国際研究協力－VAMASの超電導極低温構造材料部会での標準超電導線試料として採用され，日・米・欧の25機関で評価を受けた結果，均質性に優れた良好な線材であることが証明された。

Nb_3Sn系化合物よりも高磁界特性の優れたV_3Ga系については，In Situ法によるテープの製造技術について検討した。その結果，超電導線材だけで構成する電磁石としては世界最高の磁界を達成した金属材料技術研究所および日立製作所日立研究所の18T級電磁石の完成に役立てることができた。最近ではより高磁界を指向したNb_3Al系極細多心線材の開発研究を行っている。

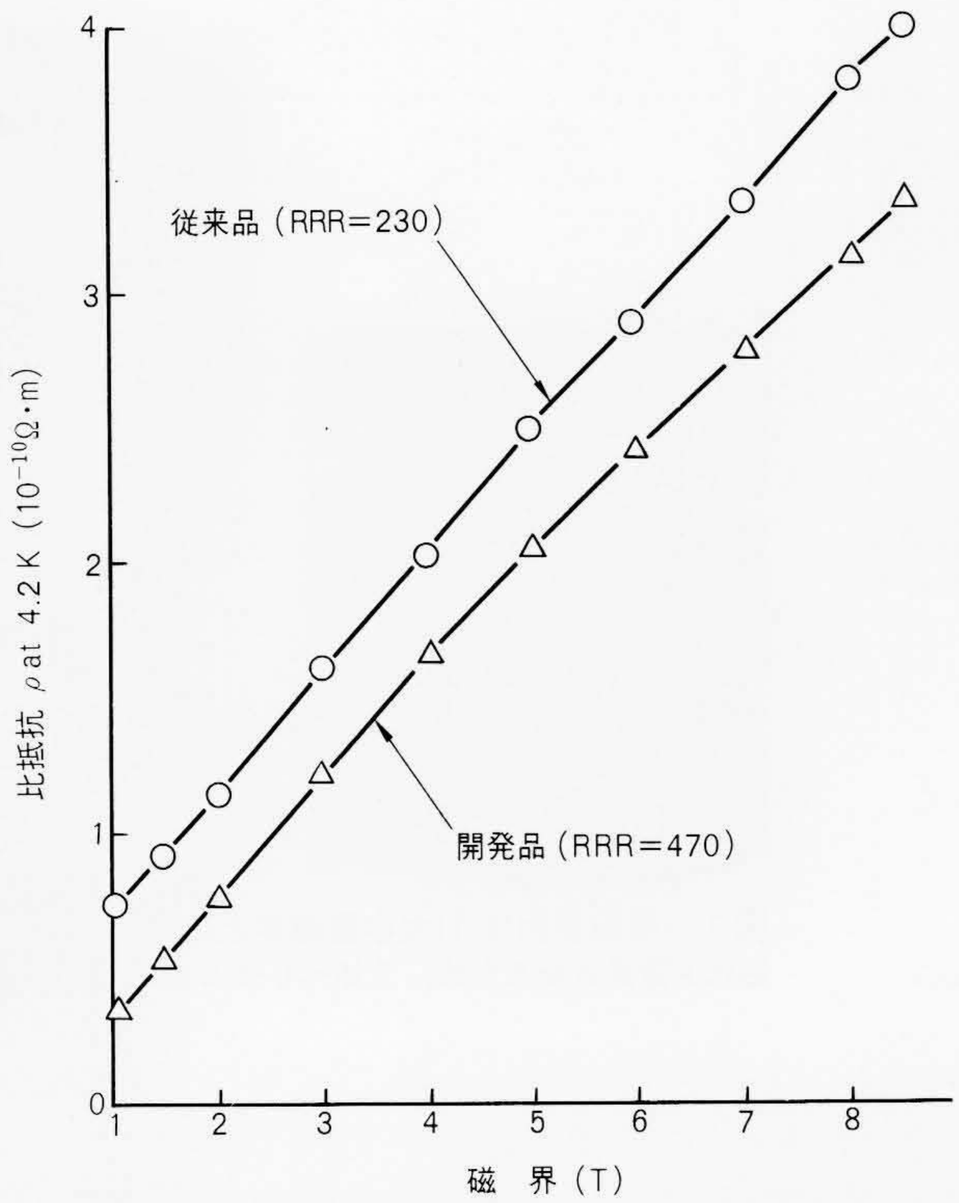
以上のように，用途によって必要な磁界の大きさや性能が異なるので，**図1**に示すような超電導線材の性能を最大限に発揮させるように，線材の設計・製造が行われる。

3　日立グループ独自の要素技術

二十余年間にわたる超電導導体の開発過程で蓄積した要素技術のうち，代表的なものを次に述べる。

3.1　安定化材用無酸素銅量産技術

超電導線を実用化するうえで必要不可欠な安定化材には無酸素銅が用いられるが，日立電線株式会社では1965年にわが国で初めて無酸素銅の連続鋳造技術を確立し，特殊な分野へ伸銅品の形で供給していた。超電導用としてはできるだけ残留抵抗が小さいものが望ましいので，材料の選定から溶解鋳造に至る一連の工程について検討を加え，社内規格として残留抵抗比200以上という値を定め，超電導用無酸素銅として別管理してきた。これまでに製作されたほとんどの導体は，その値を基準として安定化設計が行われた。しかし，無酸素銅の用途が高級化するに伴い，特性向上へのニーズが高まってきたので，それらにこたえるため特殊な溶解鋳造法の開発を試みた。1987年にこの新製造技術確立に成功し，**図2**に示すように従来品を大幅に上回る残留抵抗比を示す無酸素銅を安定化材として供給することが可能になっている。



注：略語説明　RRR（Residual Resistance Ratio：残留抵抗比）

図2　極低温用無酸素銅の磁界-比抵抗特性　　新たに開発した特殊な溶解鋳造技術によって，従来品を大幅に上回る残留抵抗を示す安定化材用無酸素銅の量産が可能になった。

3.2　静水圧押出技術

複雑な断面構造の極細多心超電導線を製造するうえで重要なことは，断面を構成する異種金属間の密着性を高め，均一な加工を行うことである。一般に採用されている方法は熱間押出法であるが，ビレットとコンテナやダイス間の摩擦によって変形の均一性が損なわれたり，押出温度が高いため構成材どうしが界面で反応を起こす可能性がある。静水圧押出しによればそのような危険性がなくなるので，日立電線株式会社では1979年に4,000トンプレスによる技術確立を行い，以後製造した導体はすべてこの工程を経ている。構成材どうしの反応がないという特長は，ブロンズ法によるNb_3Sn極細多心線や低交流損失三層構造導体の製造などによく生かされている。

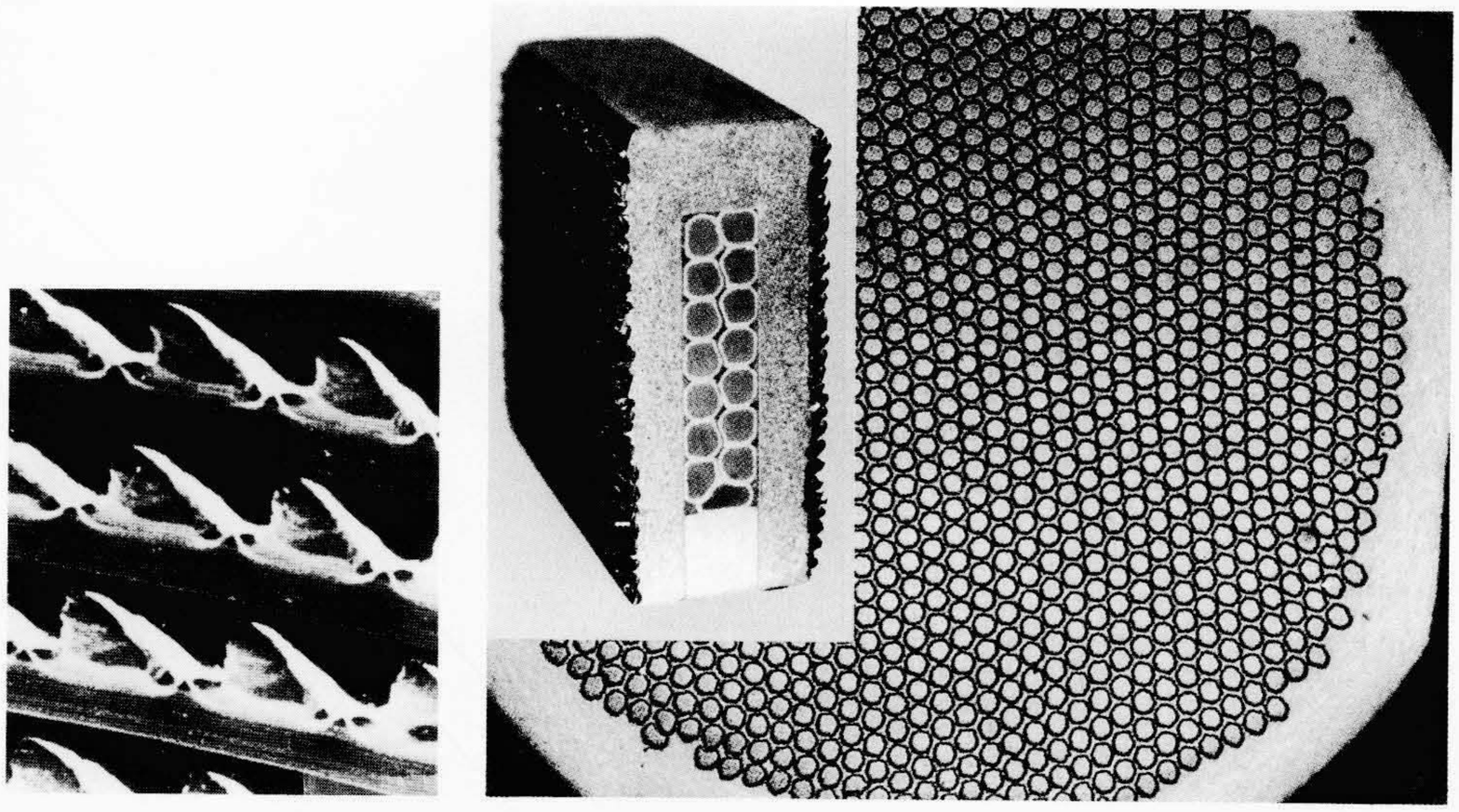
3.3　高性能伝熱面

IEA（国際エネルギー機関）の核融合用マグネット開発計画として実施されたLCT（Large Coil Task）計画では，当時としては電流容量の大きさ，磁界の強さ，コイル電流密度の大きさなどから，極限の安定化条件が求められた。コイルの設計上，許容される導体のスペースの関係で安定化材の使用量に限度があるため，浸漬（し）冷却による完全安定化を達成するには，液体ヘリウムへの熱流束を増やすことが最大の課題となった。日立電線株式会社では冷凍機など熱交換器用銅管の高性能化のため，特殊な表面加工技術の開発に努めてきたが，凝縮用伝熱管の表面に採用してきたサーモエクセルC加工面が，液体ヘリウムに対して顕著な蒸発特性を示すことを見いだした。熱流束の大きさは**図3**に示す表面凸起の形状や高さに依存し，クーリングチャネルの方向および幅寸法を考慮して最適化設計が行われた。また，熱流束を向上させる別の方法として，陽極酸化処理によって伝熱面に微細な亜酸化銅の針状結晶を晶出させることも有効であることが見いだされたので，この二つの手段を組み合わせた高性能伝熱面を開発した。通常の平滑面での有効熱流束qeは1.5～2.0 kW/m²程度であるが，フィン高さ約1 mmのサーモエクセル加工と黒化処理を組み合わせることで10 kW/m²以上のqeを達成することができた。この技術開発によってLCTコイルは厳しい条件にもかかわらず完全安定化が達成でき，国際協力の場での6コイルテストで良好な成果を収めることができた（**図3**）。

なお，この高性能伝熱面は，日本原子力研究所のTMC-Iコイル，九州大学のTRIAM-1Mにも生かされている。

3.4　前方張力付加押出法

超電導線の安定化材には一般的に銅が用いられているが，極低温では残留抵抗，熱伝導性ともに高純度アルミニウムのほうが優れている。特に，高エネルギー粒子衝突実験の検出器として用いられるソレノイドコイルには，粒子透過性の優れたアルミニウムを安定化材とする必要がある。しかし，高純度アルミニウムと超電導材料の変形抵抗の差があまりにも大きいため，複合材として伸線加工することが難しかった。そこで架空送電線用AS線（アルミニウム被覆鋼線）の製造法として開発した前方張力付加押出法（EFT法：Extrusion with



寸法：12.6 mm×26.8 mm
素線径：φ2.3 mm
フィラメント：φ50 μm×1,060本/素線
銅比：7.4
銅ハウジング：1/2H銅(サーモエクセル加工＋黒化処理)

図3　核融合用NbTi大容量導体と高性能伝熱面　臨界電流値20,000 A/8 Tの大容量導体の完全安定化を達成させるため，液体ヘリウムと接する面に特殊な加工を加え高性能伝熱面を形成させた。

Front Tension)の応用を試みることとした。すなわち，できるだけ銅比の小さい超電導線の周囲にアルミニウムを押出し被覆する方法である。その原理と導体例を**図4**に示す。従来の同心円状のAS線に比べ異形状で，かつ被覆材断面積が大きく，心線材強度の小さい複合材であるため，新たな技術開発を必要としたが，課題を解決し，世界で初めてアルミニウム安定化NbTi導体の量産に成功した。日米科学技術協力協定の一環として，FNAL(フェルミ米国国立研究所)に設置された陽子・反陽子衝突形粒子検出器用大形超電導コイルに本導体が用いられている。

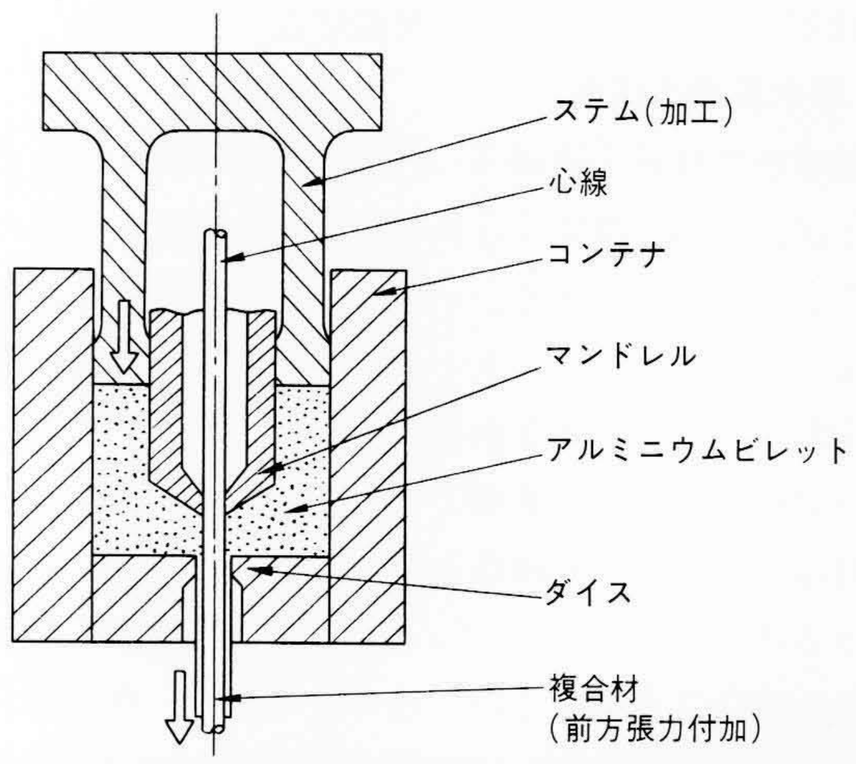
3.5 大容量複合導体製造技術

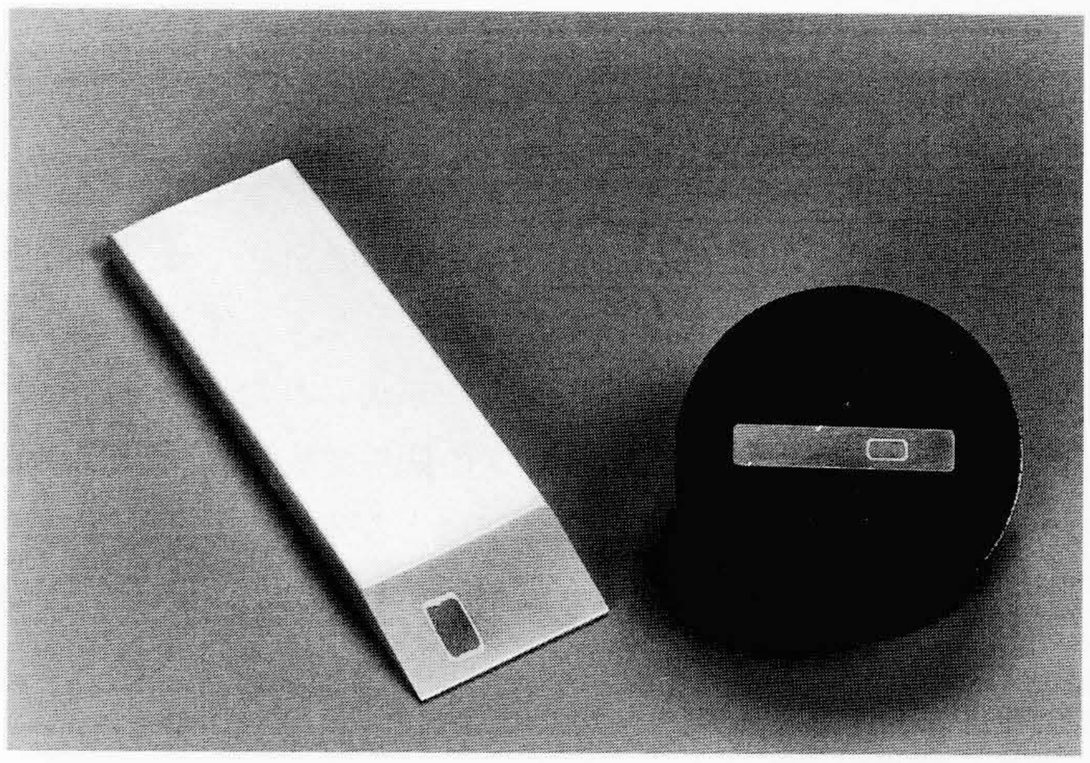
(1) 完全安定化導体

浸漬冷却形コイルでの完全安定化大容量導体を製造するには，導体構成要素の製作から組立に至る一連の工程についての技術確立が必要である。一例としてNb_3Sn大容量導体の製造工程を**図5**に示す。この導体は完全安定化を達成するため一部に高純度アルミニウムを内蔵している。超電導線本体のほかに，銅被アルミニウム平角材や門形安定化銅の製造および接続に関する技術，複合導体のはんだ組立法および接合面の探傷技術，表面加工から巻取に至る一連の要素技術確立を必要とした。また，前述のLCT用大容量NbTi導体については，成形より線技術のほかに，信頼性の高い組立加工を行うため，長さ650 mの直線状組立ラインを設置し対応した。

(2) 強制冷却型導体

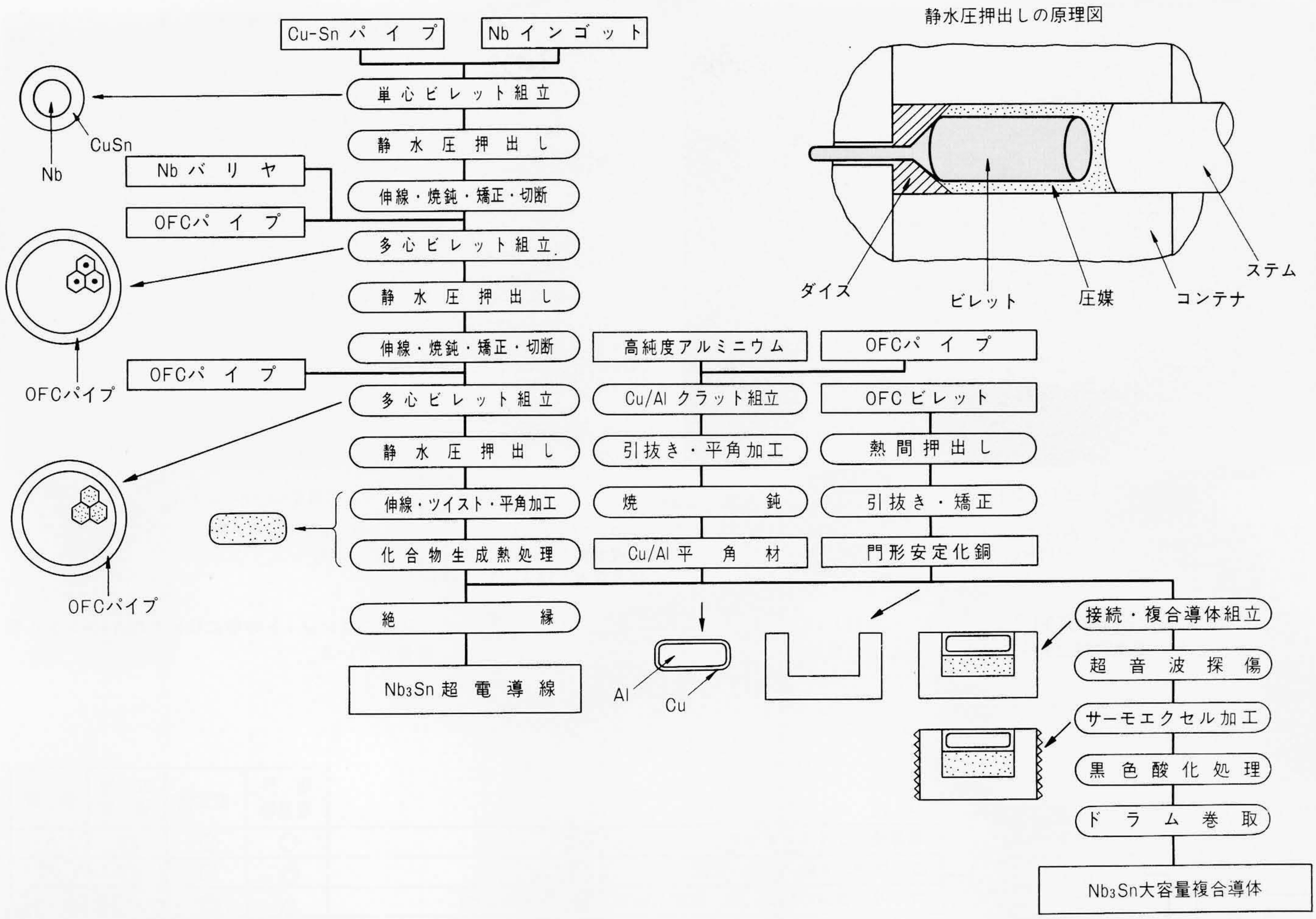
核融合装置などに用いられる大型電磁石用導体として，近年，強制冷却型導体が注目されている。日立電線株式会社でも日本原子力研究所の依頼でNbTiおよびNb_3Sn系強制冷却型導体の試作を行っている(**図6**)。NbTi系では直径1.18 mm





寸法：3.89 mm×20 mm，超電導線寸法：1.90 mm×3.65 mm
フィラメント：φ50 μm×1,700本，Al/Cu/NbTi比：21.5/1/1
臨界電流：13 kA/2T

図4　前方張力付加押出法の原理図とアルミニウム安定化NbTi導体　架空送電線用アルミ被鋼線の製造法として開発した前方張力付加押出法を用いて，世界で初めてアルミニウム安定化超電導導体の量産化に成功した。



注：略語説明　OFC (Oxgen Free Copper)

図5　Nb_3Sn系超電導導体の製造工程　静水圧押出法の特長を生かすとともに，銅被アルミニウム平角材や門形安定化材の製造，および接続に関する技術，ならびに複合導体のはんだ組立法および接合面の探傷技術，表面加工から巻取に至る一連の要素技術を確立した。

の素線を $3^4 \times 7 = 567$本より合わせてSUSのコンジットに収めたJF-30導体を試作し，より線技術，SUSの成型技術などの検討を行い，将来長尺化を図るうえでの問題点を摘出している。一方では，高純度アルミニウム内蔵Nb_3Sn強制冷却型導体を試作，評価している。

4　超電導導体開発の現状

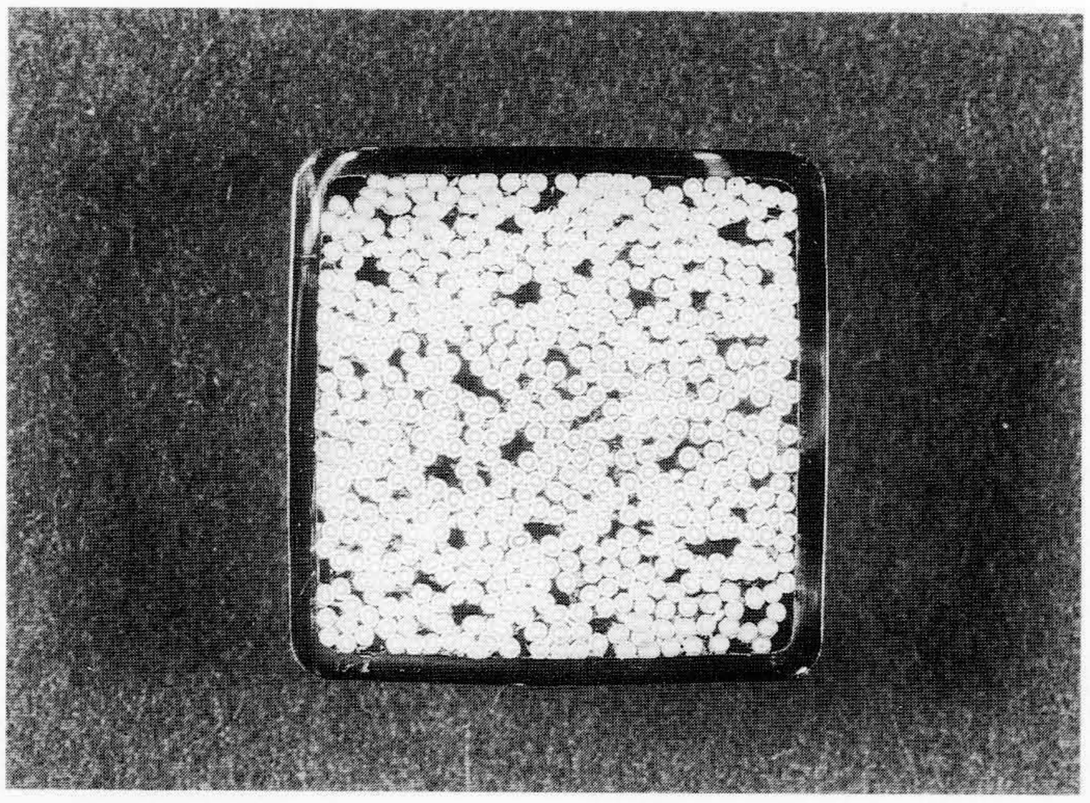
高磁場発生用超電導コイルの導体に要求される性能上の因子は，用途によってウエートの置かれ方が異なるが，一般的には臨界電流値(密度)，安定性，低交流損失，それと機械的強度である。また，ときには軽量性，粒子の透過性，耐放射線性なども要求される。一般的に要求される性能因子と導体を設計製作するうえでの諸因子との相関を，NbTiを例として**図7**に示す。同図で注意しなければならないことは，交流損失と安定性および強度との関係は，一方の改善を図ると一方の性能が損なわれるという関係にあるため，同時に最適化することが難しい点である。コイルの設計製作や冷却の問題，使用条件などを含めて総合的な検討を加え，導体設計に反映させたうえで，個々の要素技術の確立を図る必要がある。

一方では超電導材料特性そのものの向上，すなわち高電流密度化および高磁界化を目指す努力が絶えず続けられている。

4.1　加速器用導体

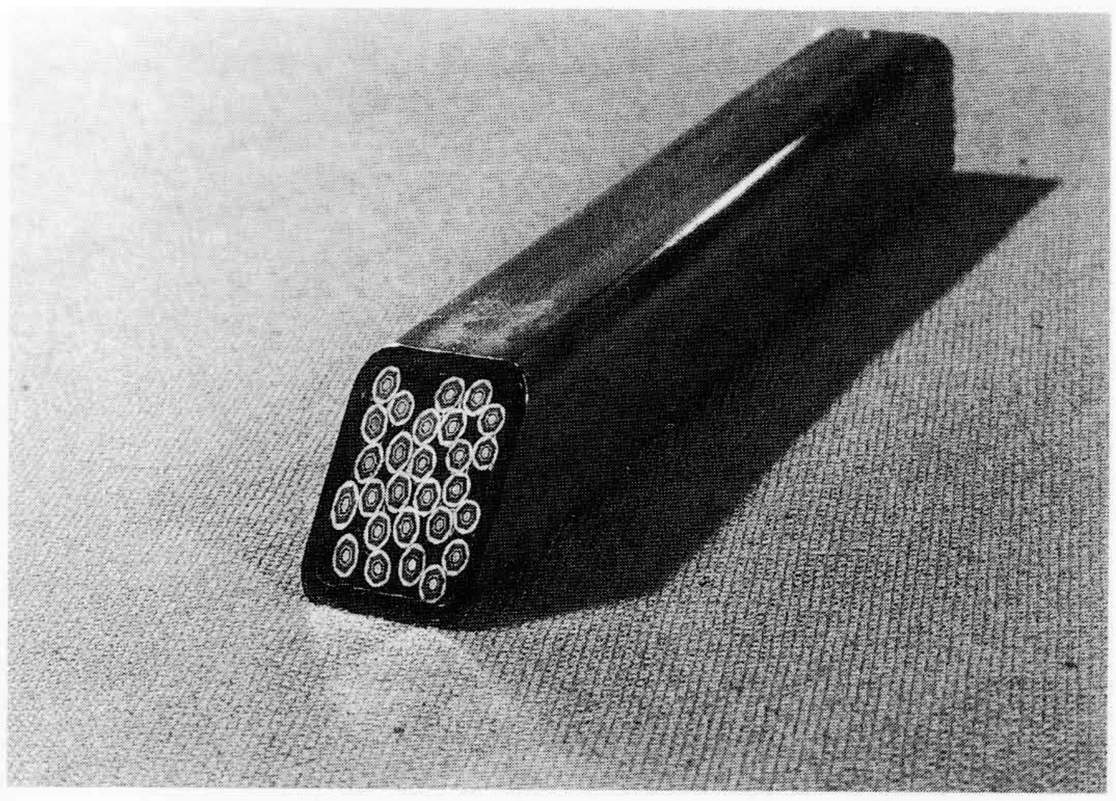
粒子加速器に用いられる超電導導体は，キーストン形(くさび形)の成型より線が主流になっている。日立電線株式会社では高エネルギー物理学研究所の加速器に用いられる四極電磁石用の導体の製造技術を確立している。本導体は直径0.68 mmの超電導素線を27本成型より線したもので，電流容量は5 Tで約8,500 Aである。素線は銅比1.1，直径7 μmの超電導フィラメントが3,700本埋め込まれており，素線表面にSn-5 Agめっき処理が施されている点に特徴がある。R&D(Research and Development)で製作した電磁石で，所定の性能を示すことが実証されている。

現在この分野での最大の課題は，米国で計画されている超大型加速器SSC(Superconducting Super Collider)用の導体開発である。SSCの主要部は周長82 km，エネルギー20 TeVの陽子衝突型の加速器リングで，これには長さ17 mの四極電



(a) NbTiバンドル型大容量導体

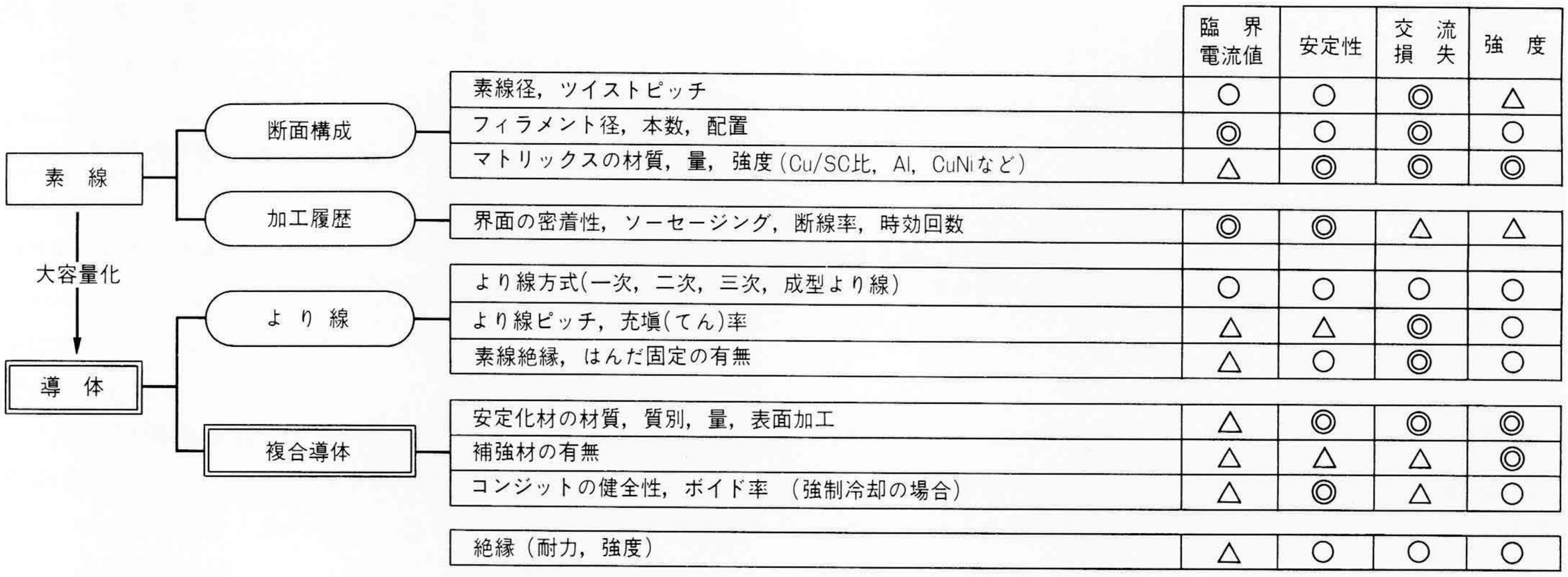
寸法：35.5 mm×35.5 mm，素材寸法：φ 1.18 mm
Cu/CuNi/NbTi：4.2/1.2/1，素線本数：3^4×7＝567本
ボイド率：34%，臨界電流：30 kA/7 T



(b) 高純度アルミニウム内蔵型Nb_3Snバンドル導体

寸法：17.2 mm×17.2 mm，素線寸法：φ 2.4 mm
素線本数：3×9＝27本，ボイド率：40%
臨界電流：15 kA/12 T

図6 NbTiおよびNb_3Sn強制冷却型導体 直径1.18 mmの素線を3^4×7＝567本より合わせて，SUSのコンジットの中に収めたNbTiバンドル型導体を試作した。電流容量は90 kA/7 Tである。また高純度アルミニウム内蔵型Nb_3Sn導体を試作，評価している。



			臨界電流値	安定性	交流損失	強度
素線	断面構成	素線径，ツイストピッチ	○	○	◎	△
		フィラメント径，本数，配置	◎	○	◎	○
		マトリックスの材質，量，強度(Cu/SC比，Al，CuNiなど)	△	◎	◎	◎
	加工履歴	界面の密着性，ソーセージング，断線率，時効回数	◎	◎	△	△
大容量化						
導体	より線	より線方式(一次，二次，三次，成型より線)	○	○	○	○
		より線ピッチ，充塡(てん)率	△	△	◎	○
		素線絶縁，はんだ固定の有無	△	○	◎	○
	複合導体	安定化材の材質，質別，量，表面加工	△	◎	◎	◎
		補強材の有無	△	△	△	◎
		コンジットの健全性，ボイド率 (強制冷却の場合)	△	◎	△	○
		絶縁(耐力，強度)	△	○	○	○

注：記号説明 ◎(相関性大)，○(相関性中)，△(相関性小)

図7 NbTi導体の設計製作因子と諸性能の相関 導体には用途によって種々な性能が要求されるが，ウエートの置かれ方が異なるので，それらに応じて設計上の最適化を図り，製作技術を確立していく必要がある。

磁石が約8,000台設置される。現在設計されている導体は内層用および外層用で仕様値が異なるが，従来の導体と比較して共に高い臨界電流密度と寸法精度が要求されている。また，フィラメント径は直径約6 μmで，電磁気的な結合を防ぐためフィラメントの間隔が規定されている。

臨界電流密度(J_c値)については，従来の加速器，例えばフェルミ米国国立研究所のTevatronに用いられた1,600～2,000 A/mm²・5 Tから大幅に引き上げられて2,750 A/mm²・5 T以上が要求されている。この値は現状で工業的に量産可能なJ_c値の最高値に近く，この性能を達成するには，加工・熱処理条件の最適化，フィラメントネッキング対策などの技術改善を必要とした。SSC用として開発した素線の磁界-臨界電流密度特性を**図8**に示す。実験室レベルでのトップデータは3,450 A/mm²・5 Tである。工業的規模で製造した素線およびケーブルについての実測値を**表2**に，フィラメントの外観と横断面を**図9**に示す。すべての項目について規格値を満足している。RRR(残留抵抗値)については，自社開発による極低温用無酸素銅を用いたことによって，規格値を大幅に上回ることができた。一方，次の段階としてフィラメント間の電磁気的結合を防ぐため，マトリックスに磁性元素であるMnを添加した線

材を試作し，種々の観点から評価試験を行っている。

4.2　核融合用導体

核融合研究用としてこれまでNbTi系およびNb_3Sn系の大容量導体を開発し，各種のプロジェクトに対応してきたが，それらはほとんど浸漬冷却型コイル用の完全安定化導体であった。次期大型装置では大型超電導システムに有利な強制冷却型が注目されており，導体開発および安定性試験を含む要素技術開発を進めている。

日本原子力研究所の委託によって現在試作検討中の導体は，**図10**に示すような構造をしている[9]。強制冷却型導体はバンドル方式とホロー方式に区分できるが，本導体はホロー方式に属し，バンドル方式と比較してNb_3Sn素線の劣化率が少なくてすむこと，接続が容易なことなどの利点が見込まれている。導体設計上の特徴としては，交流損失を低減するため安定化銅を含まない全ブロンズマトリックスのNb_3Sn素線を用いること，ヘリウム流路を構成する安定化銅を絶縁層で分割することなどが挙げられる。

一方，核融合科学研究所の大型ヘリカル装置については，ヘリカル磁場コイル用導体およびポロイダル磁場コイル用導体としてそれぞれに適した方式の導体の設計，検討を行っている。

4.3　ムーンライト計画

ムーンライト計画の関係では，NEDO-超電導発電関連機器・材料技術研究組合から受託した7万kW級超電導発電機用導体，および交流用極細多心線材の研究開発を進めている。

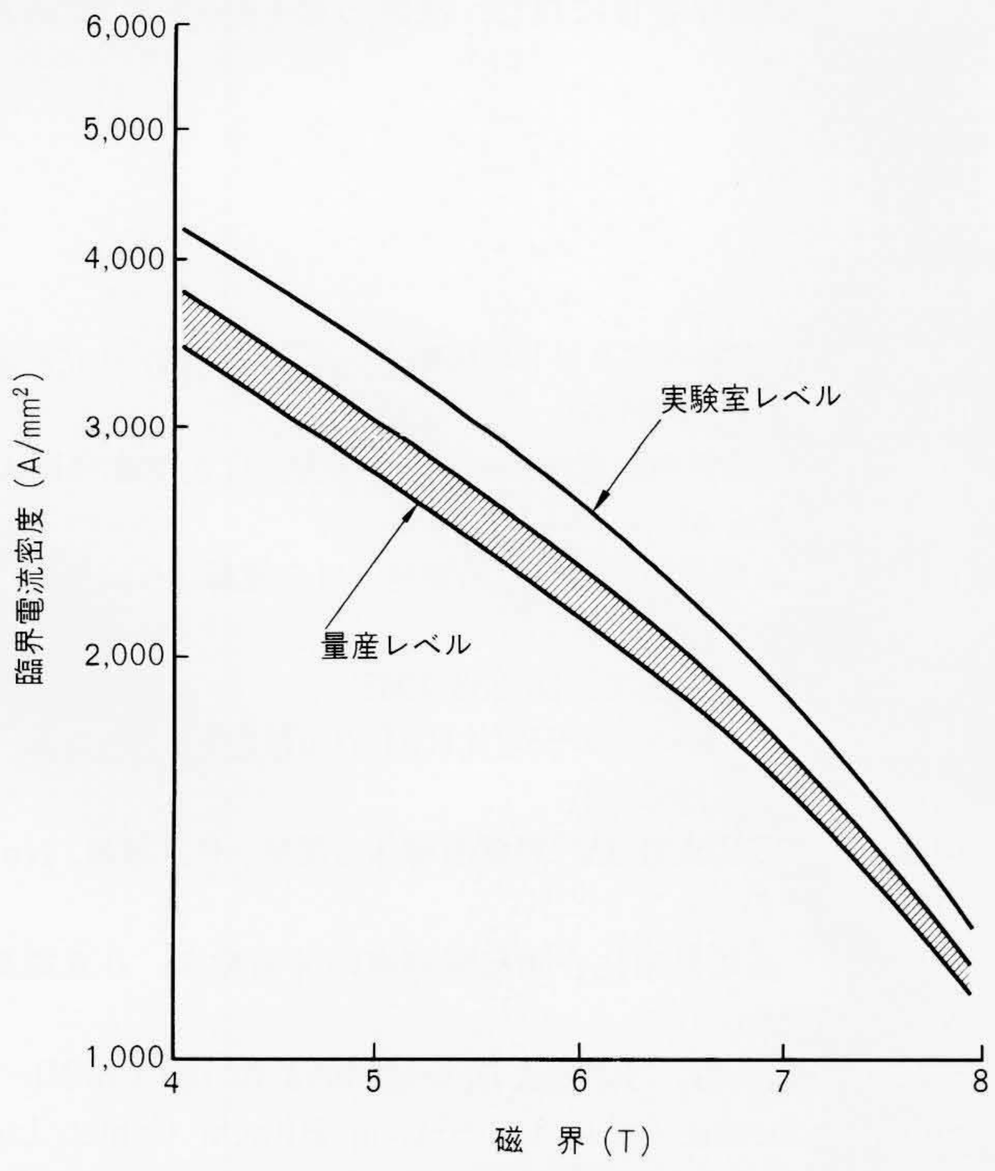


図8　SSC用導体の磁界-臨界電流密度特性　　加工-熱処理条件の最適化，フィラメントネッキング対策などの技術改善の結果，規格を満足する性能が量産レベルで得られるようになった。

表2　SSC用導体の規格値と実測値　　臨界電流密度や寸法精度など，厳しい要求が課せられているSSC用導体の製造技術を確立し，所定の性能のものが得られるようになった。

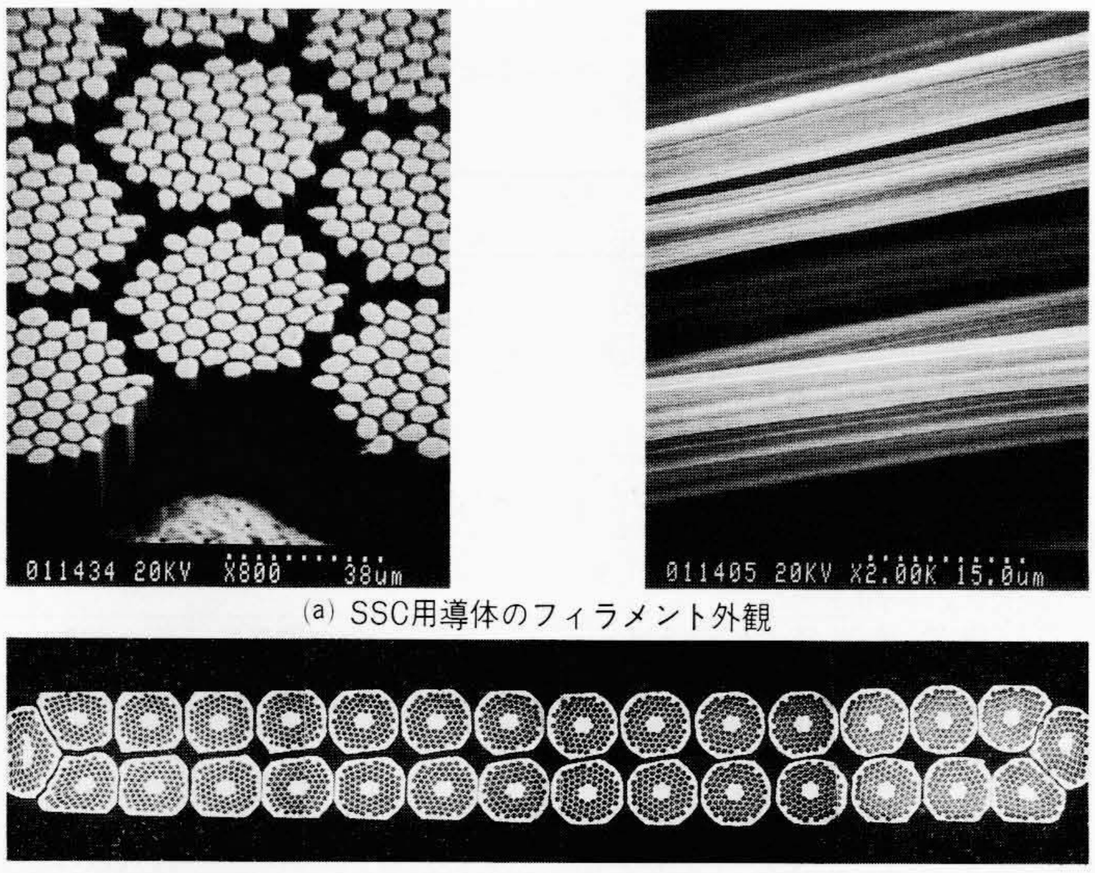
	項　目	規格値		実測値	
		内層用	外層用	内層用	外層用
素線	線　径（mm）	0.808 ±0.025	0.648 ±0.025	0.810	0.647
	銅　比	1.5 ±0.1	1.8 ±0.1	1.45	1.73
	フィラメント径（μm）	6	6	5.81	5.98
	フィラメント間隔（μm）	＞1.0	＞1.0	1.11	1.15
	ツイストピッチ（mm）	12.7 ±1.3	12.7 ±1.3	13.0	12.2
	臨界電流値（A）	≧328 at 7 T	≧285 at 5.6 T	337 at 7 T	297 at 5.6 T
	残留抵抗比（RRR）	≧83	≧89	159	192
ケーブル	素線本数（本）	23	30	23	30
	ケーブル中央部厚さ（mm）	1.458 ±0.006	1.166 ±0.006	1.463	1.170
	ケーブル幅（mm）	9.296 ±0.025	9.728 ±0.025	9.298	9.727
	より線ピッチ（mm）	78.7 ±5.1	73.7 ±5.1	80.3	75.1
	臨界電流値（A）	≧7,167 at 7 T	≧7,860 at 5.6 T	7,640 at 7 T	8,670 at 5.6 T
	残留抵抗比（RRR）	≧66	≧63	172	195

4.4　交流用導体

磁界の変動で誘起される損失には，(1) ヒステリシス損失，(2) 結合損失，(3) 渦電流損失がある。その大きさは主としてフィラメント径，ツイストピッチ(素線およびより線)，マトリックスの比抵抗，安定化材の量と形状などに依存する。NbTi導体の場合，十数年前からCu/CuNi/NbTi 3層構造の導体が提案されてきた。パルスマグネット用としては一例として**図11**に示すような導体が開発されているが，交流用にはさらにフィラメント径をサブミクロン化すること，素線径をできるだけ小さくし，ツイストピッチを短くすることなどが必要となる。すなわち，素線の断面構成，材質，寸法上の諸因子について加工性や安定性を含めて十分検討し，交流損失を極力少なくするため最適化を行ったのち，より合わせなどの手法で実用規模まで大容量化を図らねばならない。Nb_3Sn導体の場合も条件はほぼ同じで，低損失化を図るためには，ことに製造技術上の問題を解決していくことが重要である。本稿ではあまり触れないが，現在，金属系超電導導体でもっとも開発努力が注がれている分野の一つである。

4.5　新材料開発

V_3Ga系のテープに続いて実用化に近いと予想される高磁場用材料としては，Nb_3Al系化合物が挙げられる。超極細多心化による性能向上への努力が続けられているので，いずれ20 T領域で使用可能な新しい材料として採用されることが期待できる。

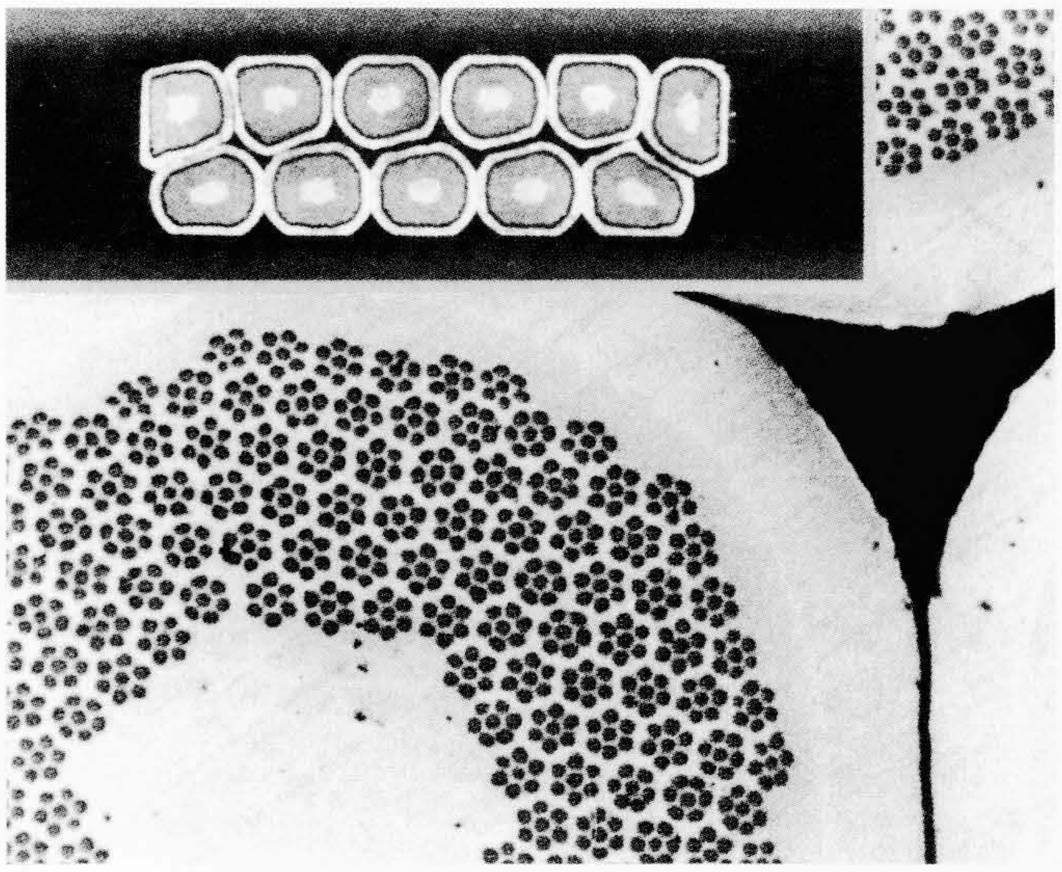


(a) SSC用導体のフィラメント外観

寸法：厚さ1.170 mm(平均値)×幅9.727 mm

(b) SSC用導体(外層用)の横断面写真

図9 SSC用導体(外層用)の断面写真とフィラメントのSEM(走査電子顕微鏡)写真 直径6 mmのフィラメントの表面には欠陥が認められず，健全な状態を示している。



寸法：2.1 mm×6.7 mm，素線径：φ 1.18 mm
フィラメント：φ 13μm×1,500本，素線数：11
Cu/CuNi/NbTi：3.3/1.5/1，臨界電流：3 kA/6 T

図11 パルスマグネット用3層構造超電導導体 Cu/CuNi/NbTi 3層構造素線を用いた成型より線の例で，交流用にはフィラメント径をサブミクロン化し，素線径をできるだけ小さくしてツイストピッチを短くする必要がある。

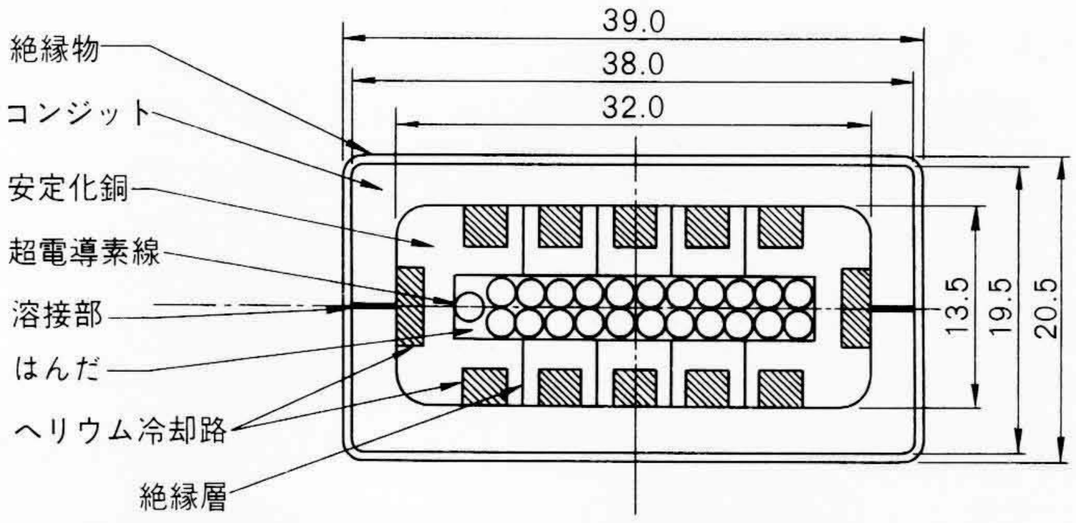


図10 核融合用Nb_3Sn強制冷却型導体 現在試作検討中の核融合用導体は電流容量60 kA/12 T(目標値)，ホロー方式に属し，バンドル型と比較するとNb_3Sn素線の劣化率が少なく，接続が容易などの利点が見込まれている。

5 結 言

金属系超電導導体の開発はMHD発電研究に端を発し，リニアモータカー，核融合，加速器などのニーズによって促進されてきた。NbTi，Nb_3Sn系導体についての特性向上と大容量化も着実に進展し，浸漬冷却型の導体に関してはかなり信頼度の高い状況に達している。ただし，電力貯蔵などの分野で設計されている10^5 A/5 T級の超大型導体や，強制冷却型の大容量導体，交流機器用導体などについては開発課題が多く残されている。一方，臨界電流密度の向上や高磁界化を目指す研究も絶えず続けられており，応用技術の進展に伴う高度な要求に対処するため開発を進めている。

応用面では，現在のところ医療用MRI装置や分析用NMR装置が普及し始めたところで，ほとんどの分野が研究開発段階にあり，21世紀に開花することが期待されている。高温超電導体の実用化にはかなりの時間がかかることが予想されている現在，金属系超電導導体の果たすべき役割は大きい。

終わりに，これまで種々な機会にご指導いただいた各大学，国立研究機関の関係各位に対し，深謝の意を表す次第である。

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**，5，381～386(昭555)
2) 森合，外：高磁界用超電導体の現状と展望，日立評論，**63**，4，253～258(昭56-4)
3) 石上，外：大電流超電導導体の開発，日立電線，No.1(1981-12)
4) 清藤，外：塑性と加工，26-288(1985)
5) 鈴木，外：アルミニウム安定化NbTi/Cu超電導線の開発，日立電線，No.2(1982-12)
6) 伊藤，外："TRIAM-IM"超電導導体の開発，日立電線，No.4(1984-12)
7) 鎌田，外：高磁界用化合物超電導線の開発動向，日立電線，No.7(1988-1)
8) S. Sakai, et al.：Recent Development of the Cu/Nb-Ti Superconducting Cable for SSC in Hitachi Cable, Ltd. IISSC Report. to be published
9) 吉田，外：原型トロイダル計画－TMC・FF導体，低温工学・超電導学会予稿集(1989年春)