

近年、核融合実験装置や電力貯蔵装置などの大型超電導磁石の開発には目覚ましいものがある。当社は、これら大型超電導磁石のコンセプトとして、機械的剛性が高く、絶縁性に優れた強制冷却超電導体を10数年前から提案し開発を続けてきた。最近では、核融合実験装置用として機械的剛性が高く絶縁性に優れた磁石で、かつ冷却効率もよく、安定して超電導状態を保てる世界最大級の強制冷却超電導磁石を製作した。

In recent years, great progress has been made in the development of large-scale superconducting magnets for experimental fusion devices, magnetic energy storage systems, and so on. Over the past 10 years, Toshiba has proposed and developed forced-cooled type superconductors which can provide high mechanical toughness and good insulation. Recently, we fabricated the world's largest forced-cooled type superconducting magnets for an experimental fusion device.

In this report, we present the technological problems and the main parameters for fabrication of the forced-cooled type large-scale superconducting magnets developed up to now.

## 1 まえがき

核融合の研究開発の進歩は目覚ましく、臨界プラズマ条件を達成している装置も出てきた。この核融合装置の磁気閉込め用の磁石には、高磁界の発生と省エネルギーのため、超電導化することが必要不可欠であり、約20年前から研究開発が行われてきた。最近、文部省核融合科学研究所で建設中の大型ヘリカル装置(LHD)と、国際協力で推進中の国際熱核融合実験炉(ITER)の工学設計活動のなかで日本原子力研究所を中心に展開されている研究開発では、大型超電導磁石の技術進歩に目覚ましいものがある。

また、電力貯蔵設備の一つとして超電導エネルギー貯蔵(SMES)も考えられており、系統電力安定化などを目的とした小規模SMESを実証する計画があり、その要素磁石が製作され試験されている。

ここでは、このような大型超電導磁石の開発課題、現状と今後の展望について述べる。

## 2 大型超電導磁石の開発課題

### 2.1 強制冷却超電導体

強制冷却超電導体は、図1に示すようにコンジットと称される管の中に超電導線(素線)を多数本撚(より)線し挿入した構造で、素線とコンジットのすき間に超臨界圧ヘリウムを流し冷却する。コンジットは、ステンレス管などで構成し、電磁力に耐えるための機械的強度の大部分を受け持つと同時に冷却媒体の圧力バウンダリを形成する。

コンジットの材質、板厚と形状などは、それぞれの磁石

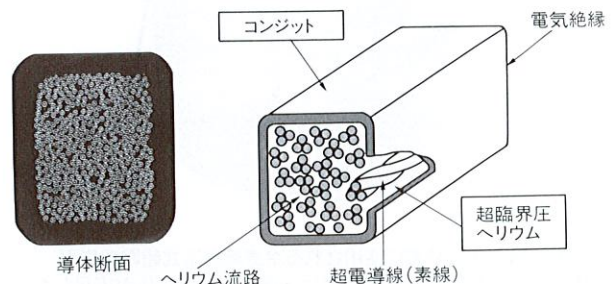


図1. 強制冷却超電導体の断面構成 写真はLHD ISコイル導体で、超臨界圧ヘリウムはコンジットの中に多数収められた素線のすき間を流れて導体を冷却する。

Cross section of forced-cooled type superconductor

に要求される機械的強度を考慮して設計する。素線は、10 Tを超えるような高磁界の場合は $Nb_3Sn$ を採用し、それより低い磁界で使用する場合は、 $NbTi$ 線を使用する。素線の設計では、臨界電流密度が高いこと、変動磁界に対して交流損失が少なくなるように素線径、超電導フィラメント径などを決定する。大型超電導磁石を実現するためには、導体の長さが非常に長くなるので、超電導線は確立された製造条件の下に安定した品質で量産できる必要がある。さらに、超電導特性を安定にするため、ポイド率を1%の範囲内に収めるように、素線の直径はミクロン単位の精度でばらつきを少なく量産する必要がある。また、コンジットは隣接する導体との電磁力の伝達を考えて、高い寸法精度と溶接信頼性が要求される。

### 2.2 大型磁石製造上の課題

大型超電導磁石のなかには、輸送限界を超えるような大



型のものが出てきた。このため、現地で大型磁石を製造することもあり得る。また、製作は室温で行い、極低温(4~5 K)下で使用するため、その間の熱収縮量が約0.3%あり(10 mに対して30 mm熱収縮する)、正確なデータから予測して製作する。

さらに、絶縁を施しながら巻線を行い、その後絶縁を加熱硬化させるが、絶縁強度を上げるため絶縁材に圧縮荷重を加え硬化させるのが通常であり、このときに絶縁寸法が加熱硬化前と後では20%程度収縮する。したがって、巻線と絶縁施工時点では最終製品寸法から製作寸法を決定し製作を進める必要がある。

また、超電導導体は、巻線間の渡り部分などで接続する。この接続部は、コンパクトであることに加えて電気抵抗を少なく、変動磁界に対して交流損失も小さくし、かつ機械強度を必要としている。

さらに、高磁界に適用されるNb<sub>3</sub>Sn導体を用いた場合は、通常巻線後に650~700度程度の熱処理を長時間行う。この熱処理のためには、大型加熱炉を均一に加熱することと清浄度を保った雰囲気管理を行う。

### 3 大型超電導磁石開発の現状

#### 3.1 強制冷却超電導体の製造

##### 3.1.1 LHD用ポロイダルコイルNbTi強制冷却導体

LHDに用いるポロイダルコイルは、それぞれ上下一対の内側垂直磁場(IV)コイル、内側形状制御(IS)コイル、外側垂直(OV)コイルから構成される。導体の全長は23 kmにも及ぶ大型超電導磁石である<sup>(1)</sup>(表1)。

強制冷却導体は、まずNbTiと銅の複合多芯(しん)線材(素線)をそれぞれの直径が5ミクロン以下の精度で製作され、486本の素線を5回撚線し(3×3×3×3×6)、図2に示すようにステンレス板を卵型に変形させた中に撚線を挿入し端部を連続して溶接後、さらに矩(く)形に成型する方法で製作した。OVコイルの場合、ロット長さが700 mにも

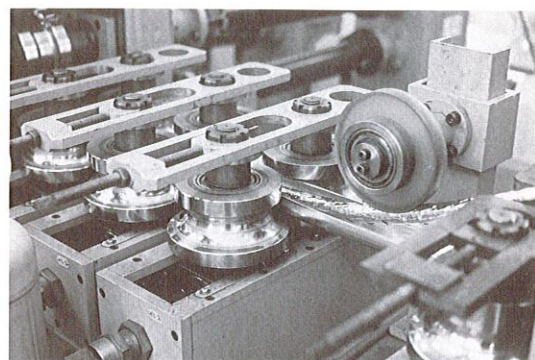


図2. 強制冷却超電導体の製造ライン ステンレステープで保護巻かれた撚線が、半円形に成形されたコンジットに挿入されるようすを示す。

Fabrication line for forced-cooled type superconductor

及ぶ。その導体製造ラインは、超電導線に悪影響を及ぼさずかつ連続溶接を長時間安定に行うため、徹底した品質管理が必要である。このため、ライン上で渦流探傷、超音波探傷、液体浸透試験、寸法管理を連続的に行った。この結果、導体の性能を左右するボイド率は37~38%の範囲内に収まり、外形寸法も0.1 mm以内の精度に収まった<sup>(3)</sup>。また完成した導体は、コンジットをかぶせたことによる臨界電流の劣化がないことも確認した。

##### 3.1.2 ITER工学設計R&Dにおける中心ソレノイド(CS)モデルコイル用Nb<sub>3</sub>Sn導体

ITER計画は、日本、米国、EU、ロシアの4極間の協力協定によって工学設計・R&D(研究開発)が現在進行中である。そのなかで、CSモデルコイルは高い発生磁場(13 T)と変動磁場(1.2 T/s)の下で使用され、かつ要求される機械強度も高い。このように高い磁場で使用される導体の場合、臨界電流密度が高くとれ、変動磁界に対する交流損失を小さく抑ええた素線の開発と、さらに機械強度が高いコンジットを用いた強制冷却導体が必要である。

このCSモデルコイルの導体諸元を表2に、また外層部に

表1. LHD用ポロイダルコイルの導体諸元  
Specifications of superconductor for LHD poloidal coils

項目	IV	IS	OV
超電導材料	NbTi	←	←
運転電流(kA)	20.8	22	31.3
最大磁場(T)	6.5	5.4	5.0
臨界電流(kA)	62.4	65	93.9
素線径(mm)	0.76	←	0.89
銅比(Cu/NbTi)	2.7	3.4	4.2
コンジット材料	SUS316L	←	←
外形寸法(mm)	23.0×27.6	←	27.5×31.8
板厚(mm)	3.0	←	3.5

←: 左に同じ

表2. CSモデルコイル用導体諸元  
Specifications of superconductor for CS model coil

項目	内層モジュールコイル	外層モジュールコイル
超電導材料	Nb <sub>3</sub> Sn	←
運転電流(kA)	46	←
最大磁場(T)	13	11
素線数(本)	1,152	1,080
素線径(mm)	0.81	←
銅比(Cu/nonCu)	1.5	←
ケーブル径寸法(mm)	40	36.7
コンジット材料	インクロイ908	←
外形寸法(mm)	51×51	46×46

←: 左に同じ



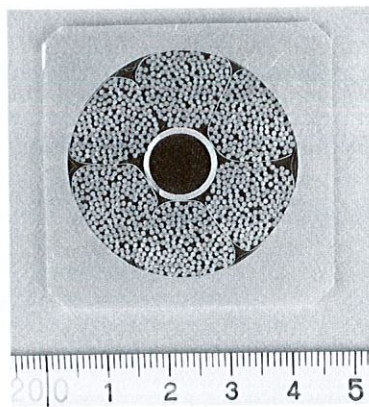


図3. CS コイルの外層モジュール用超電導体の断面 コンジット (インコイ 908) は溶接によって長尺化され、撚線の引込み後に写真のような形状に成形される。

Cross-sectional view of superconductor for outer module coil of CS model coil

用いられる導体の断面を図3に示す。インコイ 908 は、 $Nb_3Sn$  と線膨張率が近いことから採用された。コンジットは長さ方向に溶接し、この中に撚線した  $Nb_3Sn$  素線を引き込む方式で製作された。この導体は、国際協力の下各極で分担し最終導体加工は EU で行われた<sup>(2)</sup>。

**3.1.3 低交流損失用超電導体** 先の CS モデルコイル用導体や SMES 用導体では、変動磁界が大きくなるため、導体に渦電流が流れ交流損失が発生する。これを小さくするため、素線には銅などの安定化母材に埋め込まれた超電導フィラメント径をできるだけ細くし(数ミクロン)、素線内に銅の 1,000 倍の抵抗をもつ銅ニッケル合金 (CuNi) を渦電流ループを極力小さくするように配置する。さらに、素線表面には、電気抵抗の高い抵抗体を被覆するなどくふうされている<sup>(2)</sup>。

## 3.2 大型超電導磁石の製造

**3.2.1 LHD 用ポロイダルコイル** これらコイルの主な諸元を表3に示す<sup>(1)</sup>。

これらのコイルは、強制冷却型の超電導磁石として、世

界最大級の大きさをもつものであり、1991 年度に直径の小さい IV コイルから製作を開始し、96 年度 9 月に最後の OV コイルの製作を完了した。外径が 12 m を超える OV コイルは、輸送制限を超えるため岐阜県土岐市の建設現場で製作した。これら三対のコイルは、すべて 8 個のダブルパンケーキを積層した構造であり、径が異なる以外は同様の方法で製作した。OV コイルの巻線状況を図4に示す。製作スペースの有効活用のため上部に導体ドラム(約 700 m の導体をドラムに巻いたもの)を配置し、導体を下側に繰り出し、導体中央部から導体に絶縁テープを巻きつけながら下の巻芯テーブル上でダブルパンケーキ巻線を行った。その際、導体間の絶縁厚みを調整しながら精度よく巻線を行った<sup>(1)</sup>。

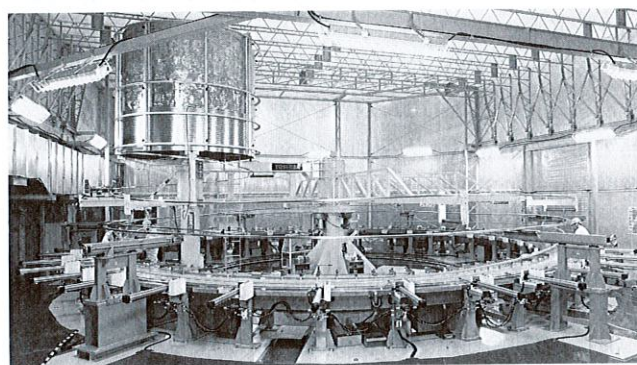


図4. LHD 用外側垂直磁場 (OV) コイルの巻線機 左上部のドラム(回転可能)から導体を供給し、下側のテーブルに精度よく巻線される。

Winding machine for outer-vertical-field (OV) coil of LHD

その後、各ダブルパンケーキ単位で絶縁加熱硬化処理を行いコイルを一体化した。OV コイルの半径は 5.5 m を超えるが、2 mm 以下の製作精度に押さえるため、厳しい寸法管理と絶縁施工法管理を行った。8 個のダブルパンケーキは、絶縁シートを挟んで積層され、最終的に対地絶縁のテープが巻かれ、部分的に設けられた支持構造体とともに再び絶縁を加熱硬化させ一体化した。完成したコイルは、装置本体と支持を取り合うため周方向 10 か所 (OV コイルでは 20 か所) がステンレスの板で覆われており、コイル導体とともにこの部分も冷却されるようになっている。図5は、LHD ポロイダルコイルのうちもっとも径の大きい OV コイルを示す。

これらの開発にあたっては、核融合科学研究所の協力を得て、導体の特性試験、IV コイルの冷却・励磁試験などを行い、その性能を確認するなど共同で R&D を展開した。

**3.2.2 CS モデルコイル** ITER 工学 R&D で製作中の CS モデルコイルは、コイル高さが約 4 m、内径 1.56 m、外径 3.6 m である。コイルは 18 層のレイヤコイルから構成されており、内側 10 層を米国が製作し (内層モジュールコイ

表3. LHD 用ポロイダルコイル諸元  
Specifications of poloidal coils for LHD

項目	IV	IS	OV
コイル中心径 (mm)	3.6	5.64	11.1
コイル高さ (m)	0.47	0.47	0.54
質量 (t)	16	25	45
起磁力 (MA)	5.0	4.5	4.5
パンケーキ数	16	16	16
ターン数	15 × 16 = 240	13 × 16 = 208	9 × 16 = 144
磁気エネルギー (MJ)	68	104	251
導体長さ (km)	2.7	3.7	5.0



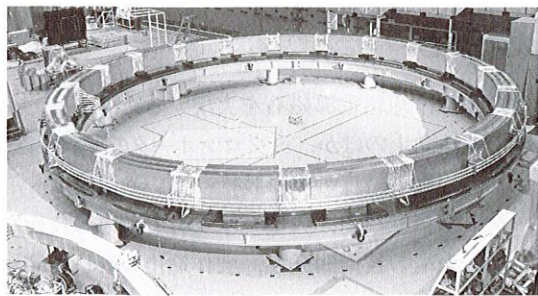


図5. 完成したLHD用OVコイル 周方向20か所がステンレス板で覆われており、コイル導体とともにこの部分も冷却されるようになっている。

Top view of completed OV coil for LHD

表4. CSモデルコイル諸元

Specifications of CS model coil

項目	内層モジュールコイル	外層モジュールコイル
コイル内径 (mm)	1,560	2,734
コイル外径 (mm)	2,714	3,600
コイル高さ (mm)	2,795	2,795
質量 (t)	46	52.6
層数	1~10	11~18
ターン数	328	272
起磁力 (MA)	115	12.5
磁気エネルギー (MJ)	641	
導体長さ (m)	2,288	2,687

ル)、外側8層を日本が製作(外層モジュールコイル)することになっている<sup>(2)</sup>(表4)。

当社は、EUで製作された導体の支給を受け、日本原子力研究所の指導の下に、外側8層の外層モジュールコイルの巻線以降の製作および米国製作の内層モジュールコイルとを組み合わせた現地据付作業を担当している。

CSモデルコイルの製作方式は、これまでの大型超電導コイルの製作方式であったパンケーキ巻方式と異なり、レイヤ巻方式になっている。コイル製作における重要課題として、剛性の高い(導体寸法が46mm<sup>2</sup>)導体の精度のよいレイヤ巻線、レイヤ間を渡る導体の三次元成形、Nb<sub>3</sub>Sn導体の熱処理を高潔度下でかつ650±5°Cの狭い温度領域で240時間を超えて実施する必要があることなど、非常に難しい製造技術があげられる。またCSモデルコイルの場合、コンジット材料にインコロイ908が採用されており、550°Cを超える熱処理を行った場合に高温酸化割れ(SAGBO)が生ずる可能性がある。これらを回避するため、巻線途中でコンジット表面にショットピーニング処理を加えてその表面を圧縮応力にしたり、熱処理の雰囲気酸素濃度0.1ppm以下、水分濃度を0.5ppm以下にするという条件下で製作している。図6にレイヤ巻線後、熱処理を完了した11層目の写真を示す。

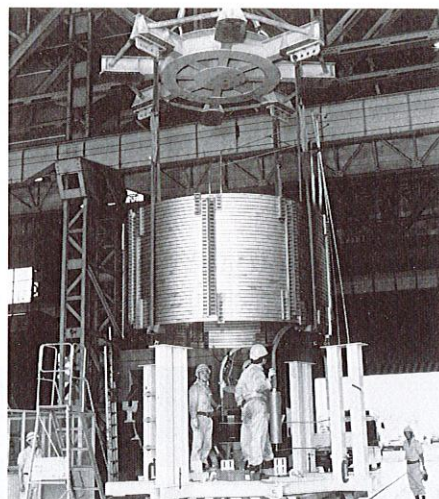


図6. CS外層モジュールコイル用11層レイヤ巻線導体 外層モジュールコイルは、この11層から18層までのレイヤ巻線導体を円筒状に重ねて構成される。

No. 11 layer coil for CS outer module coil

今後日米で逐次製作され、98年に日本原子力研究所で組立てが行われ、引き続いて各種試験が行われる予定である。

### 3.3 導体接続技術

強制冷却導体の接続では、数百本以上の素線を電気抵抗を少なく、しかもコンパクトに接合することが要求される。従来は、導体を長く重ねて200mm以上の長さにわたってはんだ付けされて接続されてきた。当社の開発した接合方法を以下に二例を紹介する。

一つは、LHDポロイダルコイルで採用されたNbTiフィラメントどうしを重ね固相拡散接合する方法で、素線の銅安定化材を硝酸で取り除き、残ったフィラメントどうしを複数の銅ブロック内の溝に収め、重ね合わせ、加熱、圧接する方法であり、製造条件はサンプル試験を基に最適化した。最終的に銅ブロックの形状は、幅37mm、高さ50mm、長さ60mmとなった(図7)。

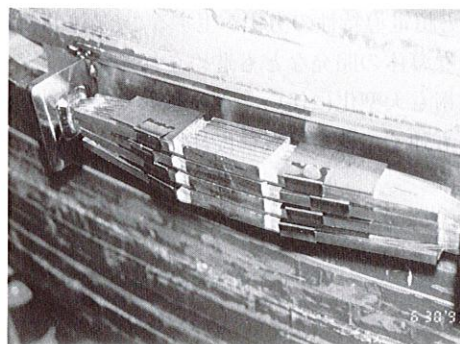


図7. LHDポロイダルコイルの導体接続 銅ブロックの形状は、幅37mm、高さ50mm、長さ60mmである。

Conductor joint of poloidal coil for LHD



もう一つは、コンパクト化を目ざして導体を突き合わせ圧接する方法も開発した。この方法は、撚線導体端部をコンパクションによりポイド率をゼロに近く一体化させ、端面を平らに仕上げた導体端面どうしを加熱圧接する方法である。CSモデルコイルのレイヤ間の渡り線の接続用に開発したサンプルを図8に示す。この接続は、 $Nb_3Sn$ 超電導体を用いて接続部抵抗が数 $n\Omega$ という低抵抗接続を実現し、交流損失もITER運転条件をクリアできる見通しを得ている。

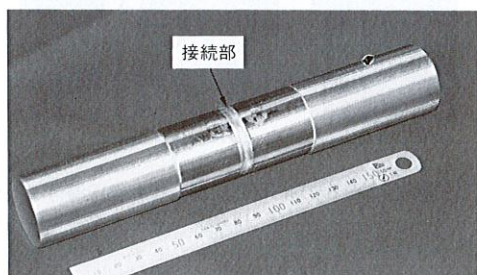


図8. CSモデルコイル用導体接続サンプル  $Nb_3Sn$ 超電導体を用いて接続部抵抗が数 $n\Omega$ という低抵抗接続を実現し、交流損失もITER運転条件をクリアできる見通しである。

Joint sample of superconductor for CS model coil

#### 4 大型超電導磁石の今後の課題

これら製作されたLHDのポロイダルコイル、製作途上のCSモデルコイルは、今後それぞれの研究所で実際の装置の運転が行われる。これらの磁石は、いずれも世界最大級であり、その試験結果は貴重なデータをもたらすものと思われる。

これらが実証された後には、ITER実機の建設も計画されている。ITERの磁石は、トロイダルコイル単体質量が740トン、単位コイル磁気エネルギーが5GJクラスのものであり、ポロイダルコイルには最大直径30mを超えるものもあり、さらなる大型化が必要である。したがって、超電導体には特性向上のほか、多数撚線した素線に対して電流を均一に流すくふう、あるいは $Nb_3Sn$ 導体は機械的ひずみが大きくなると超電導特性の劣化が生ずることから、 $Nb_3Al$ のような新たな導体の開発なども進められている。

絶縁技術も大型化に伴い、より難しくなることに加え、放射線にも強く、機械強度に優れた材料を開発していく必要もある。

#### 5 あとがき

大型の強制冷却超電導磁石を実現するためには、超電導体素線の特性向上のほか、ミクロンオーダの素線寸法管理、コンジットの高い精度の成形技術、高い巻線精度、導体のコンパクトな接続技術、大型コイル特有の絶縁技術などを駆使した最先端の技術開発と、製作途上の厳しい品質管理が必要である。今後さらに大型超電導磁石を開発するためには、いっそうの適切な材料選択と、より詳細な電磁的、機械的挙動を明確にした研究開発を行っていく必要がある。

#### 謝辞

これら大型超電導磁石の開発にあたり、多大なご指導・ご協力をいただいた核融合科学研究所、日本原子力研究所をはじめとする関係各位に深く謝意を表する次第である。

#### 文献

- (1) 高畑一也：大型ヘリカル装置のための超伝導装置の開発と設計—ポロイダルコイルの製作、プラズマ・核融合学会誌, 72, 12, pp.1334-1339 (1996)
- (2) 辻 博史, 他：中心ソレノイドコイルの開発、プラズマ・核融合学会誌, 73 増刊, pp.179-196 (1996)
- (3) 野口一郎, 他：LHD用強制冷却導体の開発(第1報)、昭和電線電纜レビュー, 45, 1, pp.55-60 (1995)



高野 広久 Hirohisa Takano

京浜事業所 機器装置部部長。  
核融合装置、超電導コイルなどの新規装置の開発設計に従事。日本機械学会、日本原子力学会会員。  
Keihin Product Operations



尾崎 章 Akira Ozaki

原子力事業部 核融合開発部グループ長。  
核融合関連機器のシステム設計・開発業務に従事。プラズマ・核融合学会、電気学会会員。  
Nuclear Energy Div.



甲斐 俊也 Tosiya Kai

原子力事業部 核融合開発部グループ長。  
核融合関連機器のシステム設計・開発業務に従事。プラズマ・核融合学会、日本機械学会会員。  
Nuclear Energy Div.



青木 伸夫 Nobuo Aoki

昭和電線電纜(株) 超電導研究部部長。  
金属系超電導線材の研究・開発に従事。低温工学会会員。  
Showa Electricwire & Cable Co., Ltd.