超伝導ポロイダルコイルの開発と製作

—ポロイダルコイルの開発と製作—

高 畑 一 也

核融合科学研究所 土岐市下石町 322-6

(1997 年 9 月 12 日受理)

Development and Fabrication of Superconducting Poloidal Coils

—Development and Fabrication of Poloidal Coils—

Kazuya TAKAHATA

National Institute for Fusion Science, 322-6 Oroshi, Toki 509-52

(Received September 12, 1997)

Synopsis:

Poloidal coils for the Large Helical Device (LHD) were fabricated and finished in September 1996. The poloidal coil system consists of three pairs of circular solenoids: inner vertical (IV), inner shaping (IS) and outer vertical (OV) coils which have a center diameter of 11.1 m. Conductors are of the NbTi cable-in-conduit type and cooled with supercritical helium. The conductors were designed to ensure high stability and safety. In addition, the conductors were strictly inspected during fabrication. A coil consists of eight double-pancake coils. To minimize the error magnetic field, the following three items were considered. First, the shapes and sizes of the feeder, layer transitions and conductor joints were optimized. Second, the coils were made to a tolerances of 2 mm. The tolerance corresponds to an extreme accuracy of about 5×10^{-4} for the diameter. Lastly, a compact superconducting joint was applied for the electric joints between pancakes.

Keywords: Large Helical Device, poloidal coil, cable-in-conduit conductor, error magnetic field, superconducting joint

1. はじめに

大型ヘリカル装置 (LHD) は、1 対のヘリカルコイルと、3 対のポロイダルコイルでプラズマ閉じ込め磁場を発生する。そのうち、ポロイダルコイルは、径の小さなものから順に、内側垂直磁場 (IV) コイル、内側形状制御 (IS) コイル、外側垂直磁場 (OV) コイルと呼ばれている。この 3 対のコイルは、プラズマ位置の制御、プラズマ断面形状の制御、周回電圧または漏洩磁場の制御を行うものであり、電源は各対が 1 個ずつ持ち運転の自由度を広げている。ヘリカルコイルとポロイダルコイルの大きな違いは、その形状の他に、冷却方式が挙げられる。ヘリカルコイルが液体ヘ

リウムを冷媒にする浸漬冷却方式であるのに対し、ポロイダルコイルは超臨界圧ヘリウムを使用した強制冷却方式を採用している。

強制冷却方式の超伝導コイルの製作・運転経験は世界的にみても少なく、実機製作開始までに 2 個の R&D コイル (直径約 2 m) を製作し、試験した。最初の R&D コイルは、安定性の不足から、期待した性能を得ることができなかった¹⁾。その主たる原因の 1 つが、素線をフォルマルで絶縁したことによる。そこで、次の R&D コイルでは、安定性を重視した設計を行い、高い性能を達成することができた²⁾。このときの導体の設計指針が、これまでの設計の基礎となっている。その設計指針については 2 章で詳しく述べる。

しかしながら、R&D コイルは実機に比べると小さなものであり、コイルの製作性については多くの課題が残された。実機導体および導体接続部については、短尺試験で超伝導性能を確認した³⁾。1995 年には、径の最も小さな IV コイルを単独通電し、総合性能確認試験を行った⁴⁾。この結果については次節で詳しく述べられる。IS、OV コイルは単体試験ができなかったが、IV コイルと全く同じ構造、設計指針で作られた導体を使用していることから、安定に通電できるものと考えている。

ポロイダルコイルには、安定な磁場を生成することは言うまでもなく、プラズマ閉じ込め向上のため、精度の高い磁場を作ることが要求された。その基準は、プラズマ表面での大域不整磁場を 4 G 以下にすることである。そのために、通常のコイルでは行わないフィーダー形状、層間渡り形状、層間接続位置の最適化

を行い、さらに導体接続部のコンパクト化を試みた。これらはいずれも理想的円形コイルと実際のコイルの形状の差に起因する不整磁場の発生を低減するものである。次に、冷却、励磁に伴う変形、製作誤差について、設計値から 2 mm 以下に抑える厳しい基準を設けた。これは、OV コイルについてみると、 2×10^{-4} に達する高い精度になり、製作上厳しい課題となった。3 および 4 章では、コイルおよび導体接続部について具体的な設計・製作の過程を紹介する。

2. ポロイダルコイル用超伝導導体の設計・作製

導体には、超臨界圧ヘリウムで冷却する NbTi ケーブル・イン・コンジット型を採用した。設計を始めた当初は、ケーブル・イン・コンジット導体を用いたマグネットの経験が世界的に見ても少なく、LHD で

Table 1 Specifications of the poloidal coils.

Conductor	IV	IS	OV
Type	Cable-in-conduit	←	←
Superconducting material	Nb-Ti	←	←
Operating current (kA)	20.8	21.6	31.3
Maximum field (T)	6.5	5.4	5.0
Critical current (kA)	62.4	64.8	93.9
Number of strands	$3^4 \times 6 = 486$	←	←
Void fraction (%)	38	←	←
Nb-Ti:Cu	1 : 2.7	1 : 3.4	1 : 4.2
Strand diameter (mm)	0.76	←	0.89
Conduit material	SUS316L	←	←
dimension (mm)	23.0×27.6	←	27.5×31.8
thickness (mm)	3.0	←	3.5
Inlet helium pressure(MPa)	1.0-0.8	←	←
temperature (K)	4.5	←	←
Flow rate per path (g/s)	3.3	2.8	3.6
Pressure drop (MPa)	0.1	←	←
Coil	IV	IS	OV
Cooling type	Forced flow	←	←
Center diameter (m)	3.6	5.64	11.1
Height (m)	0.47	0.47	0.54
Total weight (t)	16	25	45
Magnetomotive force (MA)	5.0	4.5	4.5
Number of pancakes	16	16	16
Number of turns	$15 \times 16 = 240$	$13 \times 16 = 208$	$9 \times 16 = 144$
Stored energy (MJ)	68	104	251
Conductor length (km)	2.7	3.7	5.0
Number of flow paths	16	16	16
Length of a flow path (m)	170	230	314

Fig. 1 Cross-sections of the strand and conductor for the OV coil.

は特に安全性・安定性を重視した設計を行った。これは現在でも、本コイルが開発研究が目的でなく核融合実験装置のためのコイルであることを考えると、適切な設計であったと言える。ポロイダルコイルは、第2期においてパルスの通電を行う計画となっている。この時、IV、ISコイルは最大0.4~0.5 T/sの磁場変化を受ける。安全性、安定性を重視すれば一般には交流損失が増加するが、第2期には冷却能力を増強することにより運転できるよう設計した。以下に導体設計の過程を述べる。

Table 1には、各コイル用導体の諸元を示した。まず基本仕様として、最大通電電流と最大経験磁場が与えられる。次に導体の構成であるが、燃線を $3 \times 3 \times 3 \times 3 \times 6$ の5次燃線とした。サブ冷却チャンネルは検討したが、設計時には製作信頼性が得られなかったため採用しなかった。コンジット形状はアスペクト比が約1.2の矩形とした。Fig. 1にOVコイル用導体の断面構造を示した。寸法等に差があるものの3対のコイルに使用された導体は、同様の構造を有する。以上の基本仕様から出発し、次に列記する条件を用いて寸法を決定した。

(1) 素線の表面は、銅の剥きだしとする。これにより導体内部の電流分布を均一にする。また、素線表面

の熱伝達率を高め、安定性を増加させる⁵⁾。さらに、1本の素線が常伝導に移した際、その素線の電流を他の素線に転流させることにより、超伝導回復させる³⁾。

(2) 素線の臨界電流値は、導体通電電流を素線本数で除した値の3倍とする。この条件でNbTi超伝導体の断面積を決定した。(1)で述べた電流転流による安定性向上を達成するためには、素線2本間での転流を考えた場合、臨界電流が通電電流の2倍以上である必要がある。さらに素線自身の安定性を計算し、3倍が最適であるとの結論を得た。

(3) 素線はNbTiと安定化銅のみで構成する。

(4) ボイド率(コンジット内側の空間に占めるヘリウム流路面積の割合)を38%とする。ボイド率40%の導体を使用したR&Dコイルを通電した結果、素線の動きによって考えられる不安定性が観測された¹⁾。逆に、ボイド率を小さくすると交流損失が増大する可能性がある⁶⁾。そこで、ボイド率として38%を選択した。

(5) 銅比(素線内部の超伝導体部面積に対する安定化銅部面積の割合)の決定には、いくつかの要因が影響する。(a)クエンチ時の温度上昇、(b)冷媒圧力損失、(c)安定性である。以上の要因のうち、実際には(a)と(b)が厳しく、銅比を決定する主要因になった。(a)については、長手方向、コンジットへの熱の流れを考慮しない無次元の解析を行った。熱容量として考慮するのは、超伝導体、安定化銅、ヘリウムである。クエンチ検出から電流遮断開始までの遅れ時間を

Fig. 2 Temperature increase during a quench and current discharge. The discharge time constant is 20 s.

1 秒, 電流遮断時定数を 20 秒とした。その結果を Fig. 2 に示す。最大温度上昇はいずれのコイルでも 200 K 近くとなった。OV コイルの銅比は 4.2 と市販の超伝導線に比べると大きく感じるが、クエンチ時の温度上昇を考えるとこれ以上小さくはできない。ただし実際には、コンジットへの熱の流れもあるので、安全側の設計ではある。(b) については、冷媒圧力損失は銅比と次のように関係している。つまり、銅比が決まると素線の断面積が決まり、(4) の条件からヘリウム流路面積が決定される。このヘリウム流路面積が、冷媒圧力損失に直接影響する。ヘリウム流路面積については、設計流量に対し、コイルの入口、出口間の圧力損失が 0.1 MPa となるように設計を行った。(c) の安定性については、安定性マージンが 100 mJ/cm^3 以上となることを目標にしたが、(b), (c) の条件で決定した銅比で十分この条件を満足した。無次元モデル^{3, 5)}を用いた安定性マージンの計算結果を Fig. 3 に示す。計算では、磁場を最大磁場で一定とし、電流値のみを変化させた。冷媒流量には各コイルの設計値を使用した。

(6) コンジットの厚さを、励磁した時のコンジット内部の応力が許容応力以下になるよう、またコイルの変形を 2 mm 以下に抑えるように決定した⁷⁾。その結果、IV, IS コイルでは 3.0 mm, OV コイルでは 3.5 mm となり、これまでに作られたことのあるコンジットより厚いものとなった。

Fig. 3 Stability margin calculated by a zero-dimensional model.

以上が導体設計の過程であるが、コイルとして仕様を満足するためには、導体製作過程での品質管理が重要となってくる。次に、導体製作にあたり、重点をおいた品質管理項目を紹介する。

(1) コンジットは、ステンレス板を撚線を包むように卵型に変形してゆき、端部を連続的に溶接した後、さらに平角型に成型する方法で造管された⁸⁾。ポロイダルコイル全体で製作される導体の全長は約 23 km であり、全長に渡り健全な溶接を行うことが課題となった。不完全な溶接は、低温で割れを生じ、取り返しのつかない故障となる。そこで、コンジット造管の R&D を繰り返した後に、実機の造管を行った。溶接部の探傷試験は最も厳しい条件で行い、耐圧、気密試験に加え、液体窒素温度でのヘリウムリーク試験をすべての導体について実施した。

(2) 導体の性能を左右するパラメータにボイド率がある。もしコンジット寸法が変化せず、素線径が設計値に対し $10 \mu\text{m}$ の誤差があると、ボイド率は 2 % 近く変化してしまう。従ってボイド率の制御は、素線の寸法精度に大きく依存することが分かる。実際の素線製作においては、素線径の製作誤差は $5 \mu\text{m}$ 以下であった。そしてボイド率のばらつきも 1 % 以下に収まった。

(3) 超伝導特性では、臨界電流と銅比が重要である。製作された素線は、ロットごとに両端の臨界電流と銅比が測定された。その結果、標準偏差 σ は、平均値の 3 % 程度であり、全データは、 $\pm 3\sigma$ に入っていた⁸⁾。この均一性は、製作段階での素線の熱処理条件の最適化で達成されている。完成した導体は、核融合科学研究所の大型導体試験装置で臨界電流が測定された。その結果、撚線し、コンジットを被せたことによる臨界電流の劣化がないことを確認した⁹⁾。

3. ポロイダルコイルの設計・製作

3 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された。Table 1 にコイルの諸元を示す。また Fig. 4 には IV コイルの上面図を示す。冷媒は、ダブルパンケーキの内側渡り部の冷媒導入孔より入り、コイル外側の導体接続部から出る。従ってコイル内部では、16 個の並列流路が存在することになる。コイルから出た冷媒は、マニホールドに集められ冷凍機に回収される。コイルは 10 か所、40 mm 厚さのステンレスの板で覆われている。これを「PC スリーブ」と呼

Fig. 4 Top view of the IV coil.

び、コイルを電磁力支持構造物に固定する、内部に組み込んだ冷却配管で電磁力支持構造物からの熱侵入を除去する、初期冷却の時にコイルを周囲から間接冷却するといった役割をもつ⁹⁾。

ポロイダルコイルでは、磁場精度を高めるために、従来の超伝導コイルでは行われなかった、いくつかの工夫がなされた。最初にコイルの寸法であるが、電流中心の設計位置は極低温での値とした。つまり、冷却による熱収縮を数値計算し、常温ではコイルを設計寸法より大きく製作している。また電磁力による変形は、最大でも2 mm以下とし、基準以上の不整磁場を生じないようにした。次に内外周の層間渡り部分と、フィーダー部分の形状である。この部分は、電流が軸方向に進むために、理想的な円形コイルにはない不整磁場を生み出す。これを低減するために、層間渡り形状を最適化するとともに、層間渡り部の外径側に口出しフィーダー部を設け、フィーダー部の作る不整磁場と層間渡り部の作る不整磁場が打ち消し合うように、フィーダー部の構造が最適化された。外周渡り部には、導体接続部が付随する。現在の技術では、導体接続にいくらかの空間が必要となり、コイルの外側に導体を膨らませる必要がある。これについては、できる限り低モード数の大域不整磁場を減らすために、周方向に接続部の位置を分散させた。また4章で述べるように導体接続部のコンパクト化にも努力し、最新の技術を開発・応用した。最後に磁場計算を行い、不整磁場の許容値を満足することができた¹⁰⁾。

ポロイダルコイルはすべて同様の方法で製作された

が、道路事情により、IV、ISコイルは工場で、OVコイルは現地で製作された。工場も含め、現地での製作で苦労した点は、製作スペースである。巻線、モールド、検査、積層、接続等の各工程をスムーズに行うために、コイルの約5倍の面積を必要とした。大型円形コイルの場合、縦に置けないため、中心部のスペースが無駄になってしまう傾向にある。

次にコイル製作の流れについて紹介する。Fig. 5は、専用の巻線機を用いたOVダブルパンケーキコイルの巻線風景である。まず導体ドラム（写真右上部）から導体の半分の長さが下の台に繰り出される。これが2層のうち下層の導体となる。渡り部分に冷媒導入孔を取り付けてから、下層の巻線開始となる。巻線前に導体には、絶縁テープが巻き付けられる。絶縁テープは、ポリイミドテープを半硬化のガラス繊維強化プラスチックで挿込んだものである。絶縁テープに染み込ませたエポキシ樹脂は、この段階では硬化しておらず、後のモールド（約130度）によって初めて硬化し、コイルを一体化させる。巻芯ベース上に内径側の固定治具をセッティングし、これに導体を接線方向にテンションをかけながら巻き付けた後は、緩みを生じないように外周から36本の油圧式押さえ治具で固定する。下層が巻き終わると、これを固定し、上層を巻き始める。絶縁物に金属粉等が紛れ込むと絶縁を損なう恐れがあるため、巻線は防塵室内で行われた。2 mm以下の製作誤差を維持するために、巻線中は常に寸法測定を行い、絶縁物の厚さを調節しながら巻線した。巻線が終了すると、専用の加熱炉の中で絶縁物中のエポキシ樹脂を硬化させる。ここで寸法検査を行い、可否を判定する。完成したダブルパンケーキコイルは、層間絶縁シートを挟み、8個が積層され、最終

Fig. 5 Winding machine for the OV coil.

Fig. 6 Molding furnace for the OV coil.

Fig. 7 Completed OV coil.

的に1個のコイルとなる。外側でダブルパンケーキ間の導体接続を行った後、積層されたコイルの周りには、対地絶縁のためのテープが4 mmの厚さで巻かれた。その外側にPCスリーブが取り付けられ、最終的に対地絶縁のモールドが行われる。Fig. 6は、この最終モールドを行うために、コイルにモールド炉の蓋をかぶせる瞬間である。最後に各種配管が取り付けられ、最終的な完成となる。Fig. 7はOVコイルの完成写真である。

4. 導体接続部

従来の導体接続には、ハンダを用いる等、常伝導接続が用いられてきた。この方法によると低抵抗を実現するために200 mm以上の接続長さが必要となる。接続に要する空間は不整磁場の原因になるため、コンパクト化が、重要な課題となった。そこで、NbTiフィラメント同士を固相接合する超伝導接続法を応用した¹⁰⁾。つまり、素線の銅安定化材を硝酸で取り除き、残ったNbTiフィラメントを別の銅ブロックの中で重ね合わせ、加熱・圧接する方法である。この方法

は、MRI用マグネットを永久電流モードにするための接続法として応用されていたが、20~30 kAクラスの導体でこの方法が用いられたのはこれが最初である。

超伝導体では、フィラメント径を大きくすると、磁氣的に不安定になることが知られている。フィラメントを接合することは、等価的にその径を増大させていることになる。そこで、最低何本同士の素線なら、接合しても問題がないかを実験的に調べ、その数を6本と決定した^{11, 12)}。486本の素線は、6本ずつに分割され、銅ブロックの中で接合された。開発段階では、いくつものサンプルを試作し、臨界電流を測定し、加熱温度、加圧圧力の最適化を行った。最終的に接続部の銅ブロックの最終形状は、幅37 mm、高さ50 mmそして長さ60 mmとなった。従来の抵抗接続法に比べ、コンパクトな形状となっている。また、抵抗が無視できるほど小さいため、冷凍機への熱負荷を軽減することができた⁴⁾。接続部は、コイル外周に配置し、冷媒の出口を兼ねる。従って、接続部が万が一常伝導転移してもコイルには影響が及ばない構造となっている。

5. ま と め

大型ヘリカル装置用ボロイダルコイルの設計・製作は、1991年度より開始され、1996年9月に完了した。つまり5年以上を費やしたことになる。そして来春より10年間の運転が開始される。大型ヘリカル装置のコイル系は、万が一の故障に対しても、容易に交換できる大きさではない。従ってコイルには、最大限の信頼性が要求された。このため、開発段階では、開発要素のある部品については最新の技術を検討し、各種の実証試験を行ってから採用した。またコイルの製作にあたっては、寸法管理を含めた品質管理に注意を払った。従って、核融合プラズマにとって極めて不整磁場の少ない安定した磁場を発生するものと期待している。さらに、ここで開発された技術、製作の経験は、次期の核融合装置を設計・製作する際にも必ず役立つものと期待している。

最後に(株)東芝、昭和電線電纜(株)がボロイダルコイルの製作を担当したことをここに付記し、感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) K. Takahata, et al.: Fusion Eng. Design **20** (1993) 161
- 2) K. Takahata, et al.: IEEE Trans. Magn. **30** (1994) 1705
- 3) K. Takahata, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. **3** (1993) 511
- 4) K. Takahata, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. **7** (1997) 477
- 5) K. Takahata, J. Yamamoto and T. Mito: Cryogenics **36** (1996) 163
- 6) T. M. Mower and Y. Iwasa: Cryogenics **26** (1986) 281
- 7) T. Yamamoto, et al.: *Fusion Technology 1992*, Vol. 1, Elsevier, Amsterdam (1993) 976
- 8) 野口一朗ら：昭和電線レビュー **45** (1995) 55
- 9) K. Takahata, et al.: IEEE Trans. Magn. **32** (1996) 2252
- 10) K. Nakamoto, et al.: *Fusion Technology 1994*, Vol. 2, Elsevier, Amsterdam (1994) 909
- 11) S. Hanawa, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. **5** (1995) 757
- 12) S. Hanawa, et al.: IEEE Trans. Magn. **32** (1996) 2929