



解説

核融合装置用超伝導コイルの電磁現象 — 浸漬冷却型超伝導コイル —

今川 信作
(核融合科学研究所)

Electromagnetic Phenomena in Superconducting Magnet for Fusion Facility
— Pool-Cooled Superconducting Coil —

IMAGAWA Shinsaku
National Institute for Fusion Science, Tokyo 509-5292, Japan
(Received 13 May 2002)

Abstract

The features of superconducting coils for nuclear fusion devices include large size, high field, and high current density. A large conductor is needed for such a large coil to suppress the voltage increase. Since the ability of pool-cooling becomes relatively less with the increase of conductor size, new technologies are necessary to achieve both sufficient mechanical strength and cryogenic stability with high current density. A composite conductor of the 20 kA class was developed for the LHD helical coils. The conductor consists of a pure aluminum stabilizer, a copper sheath, and NbTi/Cu strands. New electromagnetic phenomena, which are Hall current and slow current diffusion into the stabilizer, deteriorate the cryogenic stability. The mechanism and countermeasures are described. Furthermore, a perspective on pool-cooled coils is discussed.

Keywords:

superconducting coil, pool-cooled, electromagnetic phenomena, dynamic stability, cold-end recovery current, minimum propagating zone, Hall current, current diffusion

1. はじめに

磁場閉じ込め方式の核融合炉では強い磁場を定常的に生成しておく必要があるため、主に運転コストの観点から超伝導コイルが必須であると考えられている。超伝導現象が発見されたのは1911年であるが、超伝導の電力応用が始まったのはNbTiが発見された1960年以降となる。それからの40年間において超伝導コイル技術は飛躍的に進化して、核融合炉に適用可能な大型超伝導コイルも現実的になってきた。

高温超伝導体の発見や小形冷凍機の進歩あるいは熱設
author's e-mail: imagawa@LHD.nifs.ac.jp

計の高度化によって、近年はいくつかの冷却方式が選択可能であり、冷媒を使わない伝導冷却の超伝導コイルも実用化されている。しかしながら、大型応用となるとヘリウム冷凍機と金属系超伝導線材の組み合わせが今のところは最適と考えられる。この場合には冷媒であるヘリウムを強制的に循環させるか否かで、強制冷却型と浸漬冷却型に大別される。1976年から始まったLCT計画[1]の6個のトロイダルコイルでは両方の冷却方式が採用された。同時期に設計・製作されたMFTF-B[2]、TRIAM-1M[3]およびTore Supra[4]は浸漬冷却型であるが、ロ

シアの T-15[5]は強制冷却型である。その後、ITER 計画の工学 R&D コイル[6,7]が大きな牽引力となり、強制冷却型のケーブル・イン・コンジット導体の研究開発が急速に進展した。1990年より製作が開始された LHD[8]のポロイダルコイルを始め、現在製作中の W-7X[9]、KSTAR[10]および SST-1[11]でも同種の導体が採用されており、最近では LHD のヘリカルコイルが唯一の浸漬冷却型である。

こういう背景から、浸漬冷却型はあたかも旧式のような印象すら与えるようになってしまったが、当然のことながら特有の優れた面もある。本稿の目的は核融合装置用超伝導コイルの電磁現象の解説であるが、まず 2 章では浸漬冷却型の特徴や開発の歴史を整理する。3 章において浸漬冷却導体の冷却安定化の考え方を説明してから、4 章において大型導体特有の電磁現象について説明する。5 章では大型化の課題と展望について整理してみたい。

2. 浸漬冷却型超伝導コイルおよび導体の開発の進展

2.1 核融合装置用浸漬冷却コイルの特徴

核融合装置用の超伝導コイルの特徴は、大型であり、かつ高磁場が要請される点にある。しかも設置空間に制約があるために高い電流密度も要求される。単に巻線数を増やして大型化すると、コイル保護のための緊急遮断時の発生電圧が高くなり、機械剛性も低下する問題があるため、高強度・高剛性・高電流密度の大電流導体が必要であると考えられている。

浸漬冷却型とは、冷媒のプールに超伝導導体を浸すだけで冷却する簡便な方式である。発熱が少ない場合には自然対流によって冷媒が流動する。導体表面からの発熱密度が高くなると沸騰状態となり、ヘリウム気泡の浮力による対流も加わる。冷凍システムとしては、強制的に冷媒を循環させる必要がなく、ヘリウム液面と回収圧力を保持するだけの制御でよい。超伝導コイルとしては、液体ヘリウムとの濡れ面積を広くすることと、ヘリウム気泡を速やかにコイル外部に排出する流路を確保することが重要であり、概してコイル強度との両立が課題となる。電気絶縁は導体間に挿入された絶縁スペーサ等によって確保されるが、冷却のための導体裸面同士が隣接する構造となるため、電気絶縁耐力の確保も重要な課題となる。

大型超伝導コイルでは、電磁力も蓄積磁気エネルギーも大きいため、超伝導導体には低抵抗の金属、すなわち、

安定化材を付加して冷却安定な設計とするのが一般的である。冷却安定の基本的な考え方は、機械的な動き等による発熱によって部分的に常伝導状態になった導体を、その抵抗発熱を上回る冷却能により超伝導に回復させることである。電流密度が等しい条件では、抵抗発熱は導体断面積に比例すなわち断面寸法の 2 乗に比例するので、対して冷却面積はペリメータ（ぬれ縁長さ）に比例するので、導体外表面が冷却面となる浸漬冷却型では、大型導体になるほど冷却が不利になる。このため、次のような方法が開発されている。(1)導体断面形状の縦横比を大きくしてペリメータを拡大、(2)表面にフィンを付けて実効的な表面積を拡大、(3)導体表面を酸化（黒化処理）して表面張力を低下させて、液体ヘリウムの熱伝達を改善、(4)安定化材に高純度の金属を採用して抵抗発熱を低下。しかしながら、いずれの方法も万能ではなく、巻線性や機械強度が低下するといった欠点もあるので、大型コイルにおいて高い電流密度を確保するためには工夫が必要である。

2.2 核融合装置用浸漬冷却コイルの開発の歴史

浸漬冷却型は冷媒を強制循環させる必要がなく、また、冷却安定な設計手法が早くに確立したので、核融合装置用の大型超伝導コイルにも広く適用されてきた。核融合装置用浸漬冷却型コイルの代表例を Table 1 に示し、その導体断面を Fig. 1 に示す。高磁場になるほど超伝導線の臨界電流密度が低下し、銅の安定化材は抵抗値が高くなるため、高電流密度の実現が難しくなる。3 種類の LCT コイル用導体に共通する工夫は、溝加工やフィン追加によるペリメータの拡大である。特に日本コイルでは黒化処理も併用することによって有効熱流束を従来値の 4 倍近くにまで高めることに成功している。強制冷却型も含めてすべてのコイルが、4.2 K 冷却の NbTi 線材としては限界と考えられた経験磁界 8 T 以上の通電に成功し、核融合炉用大型超伝導コイルの実現に向けて重要な布石となった。同時にいくつかの技術課題も明らかになり、GD コイルでは対地絶縁不良の発生が報告されている。

TRIAM-1M では超伝導材に Nb₃Sn を採用するだけでなく、導体表面にはフィン追加と黒化処理を施し、さらに高純度アルミニウムを安定化材に採用した先進導体の開発に成功して、プラズマ中心磁場で 8 T、導体経験磁界で 11 T をコイルクエンチ（コイル全体に常伝導部が広がること）なしに達成している。

これらに続いて建設が開始された Tore Supra では 1.8 K の超流動ヘリウム冷却を採用することによって、

Table 1 The main characteristics of pool-cooled superconducting coils for fusion devices.

		LCT (GD)	LCT (GE)	LCT (Japan)	TRIAM-1M	MFTF-B A2O coil	Tore Supra	LHD Helical coil
Start/Finish of manufacturing		1976/1987	1976/1987	1976/1987	1979/1986	1977/1986	1981/1988	1990/1998
Superconductor		NbTi	NbTi	NbTi	Nb ₃ Sn	NbTi	NbTi	NbTi
Bath temperature	K	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	1.8	4.4/1.8
Design current	kA	10.2	10.5	10.22	6.202	4.542	1.4	13.0/17.33
Current density (winding)	MA/m ²	27.4	24.7	26.6	57.4	23.8	40	40/53
MA turns per coil	MA	6.4	6.53	6.73	2.05	9.75	2.8	5.85/7.8
Conductor								
Dimension	mm	31.2×9.63	41.75×10.3	26.8×12.6	14.0×7.1	12.4×12.4	5.6×2.8	12.5×18.0
Magnetic field	T	8	8	8	10.8	7.75	9	6.9/9.2
Current density (conductor)	MA/m ²	37.99	35.12	30.26	62.4	29.5	90	57.9/77.1
Stabilizer material		Cu	Cu	Cu	pure Al + Cu	Cu	Cu	pure Al + Cu
Strand diameter	mm	1.64	1.77	2.3	-	-	-	1.74
Number of strands		23	16	15	-	-	-	15
Strand twist pitch	mm	138	388	150	-	-	-	132
Filament diameter	μm	21	50	50	4	200	23	47
Number of filaments		2100	666	1060	361×1447	-	11000	726
Filament twist pitch	mm	100	37	30	320	150	-	26
Cooled perimeter	mm	47.1	134.8	36.4	14.2	-	-	25.6 - 40.9
Effective heat flux	W/cm ²	0.17	0.27	0.87	0.85	-	-	0.29

NbTi線材で経験磁界9 Tと40 A/mm²の高電流密度を達成している。このコイルのもう1つの特徴は、大型コイルであるにも拘わらず電流値が1.4 kAの小型導体を採用している点である。18個のトロイダルコイルの1個が短絡事故を起してしまった直接の原因は、コイルへの金属異物の混入と報告されている[12]が、印加電圧を高く設定したことがそのポテンシャルを高めてしまったと考えられる。短絡事故の後には、外部抵抗による遮断時定数を14 sから120 sに変更するとともに保護回路を見直して最大印加電圧を500 V以下に低下させている。浸漬冷却型コイルの製造においては、電気絶縁不良につながるような導電性異物の混入防止が最も重要であることを改めて認識させられる結果となっている。

LHDのヘリカルコイルは、形状が複雑な上に高い製作精度と高電流密度が要求されたため、1/5スケールのR&Dコイルの製作経験を経て、最終的には浸漬冷却型が選択された。このコイルは作業性の制約から巻線時に電磁力に相当する引張力を加えることが困難と考えられたので、導体が動いてもコイルクエンチには至らないように冷却安定性の高い導体の開発が進められた。高磁場中の低抵抗を実現するために安定化材には高純度アルミニウムを採用する方針として、様々な導体の試作が実施され、最終的にはFig. 1の最後に示すような複合導体を選択された。当初の開発目標は定格20 kAを超える大型導体であったが、後述するようにホール電流による磁気抵抗の異常な増大のために高電流密度と冷却安定性を両立させることが難しく、やや小型の導体になっている。この導体の特徴は次のように纏められる。(1)安定化材に

高純度アルミニウムを採用し、磁気抵抗を抑制するために高純度アルミニウムのクラッド材にCu-2%Niを採用、(2)ヘリカル形状へのロール成形および電磁力に耐えられるように銅シースの蓋は溶接、(3)熱伝達向上のために表面を黒化処理。ただし、4面ロール成形が必要なためフィン追加等はなし。

LHDヘリカルコイルは冷却安定であることが目標であったが、最初の高磁場励磁において定格電流値の88%において広域の常伝導伝播が発生して緊急遮断が作動した[13]。その後の励磁においても同じような負荷率において有限長の常伝導伝播が繰り返して観測されるため、それを超えない範囲でプラズマ実験が行われている。この原因については4.2節で詳しく説明する。

3. 浸漬冷却型超伝導導体の冷却安定化

3.1 超伝導導体の発熱

超伝導導体の発熱には、常伝導状態になった際の抵抗発熱(ジュール発熱)のほかに変動磁場による交流損失がある。交流損失は超伝導線の磁化に起因する履歴損失(ヒステリシス損失)と超伝導熱線の作る様々な閉ループに流れる電流が原因の結合損失、および、安定化材等の常伝導部材の渦電流損失の3つに大別される。履歴損失を減らすためには1つの超伝導導体の直径(フィラメント径)を小さくすることが有効であるため、核融合装置用の大型コイルでも極細多芯線が採用され、フィラメント径を数μmまで小さくする場合もある。極細多芯線とは多数のフィラメント状の超伝導導体が常伝導母材に埋め込まれた線であり、伸線の繰返しと最終段階でのツイスト

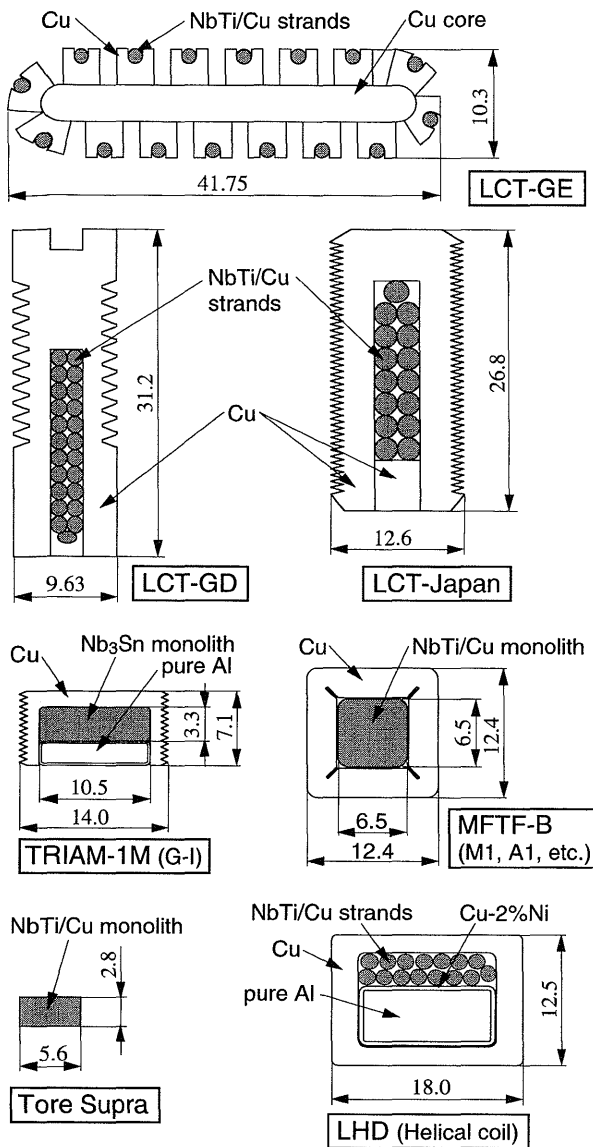


Fig. 1 Cross-sections of pool-cooled conductors for LCT, MFTF-B, TRIAM-1M, Tore Supra and LHD Helical coil.

によって直径 1 mm 程度の撚られた線(素線)となる。大型導体では多数の極細多芯線を撚り合わせるようになるが、このような撚線導体の結合損失を減らすためには、各々の閉ループの大きさを小さくして、かつ、フィラメント間や素線間の接触部の横断抵抗を大きくすることが有効である。そのため撚りピッチを短くして、さらに、フィラメント母材の抵抗値を大きくしたり、素線表面のコーティング等の様々な工夫が施される。

一方、抵抗発熱を低減するには低抵抗の安定化材を超伝導線の回りに付加するほかに方法はない。フィラメン

ト母材には超伝導体との相性の良さから銅あるいは銅合金が使用されるが、銅は磁気抵抗が大きいので、高磁場でも十分な低抵抗を維持するには大量に必要となる。その点、純アルミニウムは磁気抵抗が小さく、高磁場側で銅の1/10以下の抵抗率を達成することは容易である。しかしながら、機械強度が小さいために、大型コイル用導体の場合には別に強度部材が必要となる。LHDヘリカルコイル導体では、高純度アルミニウム安定化材の周囲を強度部材としての銅シースで囲んだ構造が採用された。このことは4.1節で後述する新たな問題を生み出した。

3.2 飽和ヘリウムによる冷却

浸漬冷却型の冷却安定の条件にはいくつかの種類があり、安定度の高い順に並べると、Steklyの完全安定、低温端安定(またはMaddockの安定化基準)、最小伝播領域基準などがある[14, 15]。いずれも導体の周囲には飽和温度の液体ヘリウムが存在していることが前提条件で、冷却能が常伝導転移による抵抗発熱を上回れば超伝導に回復するという考え方である。超伝導導体の断面内の温度分布は一様であるとして、温度変化が準定常的な場合には次式の一次元熱平衡方程式が成立する。

$$\frac{d}{dx} \left[Ak(\theta) \frac{d\theta}{dx} \right] = W(\theta) - G(\theta) \quad (1)$$

θ は導体温度、 G は単位長さあたりの発熱量、 W は液体ヘリウムによって冷却される単位長さあたりの熱量、 A は断面積、 k は熱伝導率である。ここで $z = k(\theta) d\theta/dx$ とおいて式(1)から x を消去すると次式が得られる。

$$z \frac{dz}{d\theta} = \frac{k(\theta)}{A} \{W(\theta) - G(\theta)\} \quad (2)$$

これを θ で積分すると

$$\int_{z_0}^{z_1} z dz = \int_{\theta_0}^{\theta_1} \frac{k(\theta)}{A} [W(\theta) - G(\theta)] d\theta \quad (3)$$

が得られる。常伝導と超伝導の境界から十分に離れた位置および常伝導部の中央では $d\theta/dx = 0$ となるので、この範囲を積分範囲とすると左辺は零となり、Maddock等面積則として知られる次式が得られる。

$$\int_0^{\theta_1} k(\theta) [W(\theta) - G(\theta)] d\theta = 0 \quad (4)$$

この式は、冷却と発熱の各々の温度積分値、すなわち Fig. 2 に示すようなヘリウムの沸騰曲線と導体の発熱曲線に囲まれた面積の大小を比較することによって導体の

熱平衡を判別できることを意味している。熱伝達率は導体の表面状態や姿勢あるいは周囲の影響を受けて変化しやすく、また、核沸騰と膜沸騰の間の遷移領域では測定が困難であるにも拘わらず、この方法は実際のコイル設計にも広く使用されている。

超伝導導体の一部分に十分に長い常伝導部が発生した場合の熱平衡が「低温端安定」条件であり、この場合には導体の最高温度は導体の発熱曲線とヘリウムの膜沸騰曲線の交点となる。常伝導部中央の膜沸騰領域では発熱過多だが、常伝導部端部では冷却が上回っており、導体の熱伝導を考慮した熱平衡から常伝導部が拡大するか収縮するかを判定する。ちょうどこの条件を満たす電流値は低温端回復電流 (cold-end recovery current) または最小伝播電流 (minimum propagating current) と呼ばれ、運転電流がこの電流値以下であれば、擾乱によってかなり長い部分が常伝導になっても、擾乱がなくなれば常伝導部は収縮してやがて超伝導に回復する。

一方、「Steklyの完全安定」とは常伝導部の全域で冷却が発熱を上回る条件であり、液体ヘリウムに囲まれている限りは擾乱がなくなれば速やかに超伝導に回復する。液体ヘリウムの沸騰曲線と比較すると、発熱曲線が極小熱流束を超えない条件に該当しており、この条件を満足する電流値は低温端回復電流よりもかなり低くなる。

実際の超伝導コイルにおいては、十分に長い常伝導部を発生させるような大きな擾乱の発生頻度は少ないので、繰り返し励磁等によってコイル内部の擾乱を軽減させることによって低温端回復電流を超えた電流値でも使用可能となる。この場合の冷却安定性は「最小伝播領域基準」の考え方で説明される。擾乱によって生成される

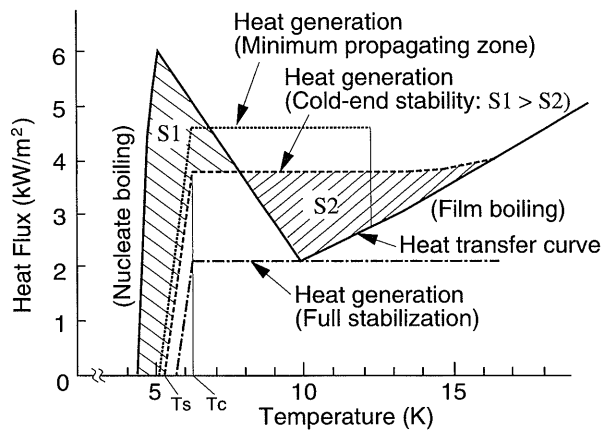


Fig. 2 Equal-area diagram for the cold-end stability, full stabilization and the minimum propagating zone criterion.

常伝導部が短いと熱伝導による冷却効果が効いて常伝導部中央の到達温度は低くなる。この際の熱平衡は、Fig. 2に点線で示すように高温側の発熱過多の面積が狭くなる分だけ、高い電流値で釣り合うようになる。しかし、擾乱の大きさはコイル形状だけでなく巻線方法にも依存するため、最大値の予測は困難である。もし、想定よりも大きな擾乱が発生するとコイルクエンチに至ることになるため、この基準は大型コイルの設計には適さない。

4. 大型導体における電磁現象

4.1 複合導体におけるホール電流と磁気抵抗

金属の電気抵抗は温度の低下とともに小さくなり、極低温では含有不純物と格子欠陥の量に対応する一定値に収束する。純度の高い金属ほど収束値は低くなり、常温の値に対する比の逆数である残留抵抗比 (RRR) は大きくなる。磁場中で金属に電流を流すと伝導電子あるいはホールの軌道が外部磁場によって曲げられるため、電場 (ホール電場) が形成され、かつ、電気抵抗が増加する。電気抵抗の増加分は磁気抵抗と呼ばれ、伝導電子やホールの軌道が長くなることが原因であるが、実際にはかなり複雑な現象である。超伝導導体の主要な安定化材である銅とアルミニウムの磁場中の電気抵抗の例を Fig. 3に示す[16, 17]。銅の磁気抵抗は 10 T でも飽和せずに増大するのに対してアルミニウムは 1 T くらいで飽和するため、高磁場では10倍以上の差に拡大する。ホール電場は磁場と電流に直交する方向に形成され電流密度に比例する。単一材に一樣に輸送電流が流れる場合には表面が帯電するだけだが、外部に短絡回路がある場合には断面内に電流 (ホール電流) が流れて磁気抵抗がさらに増大す

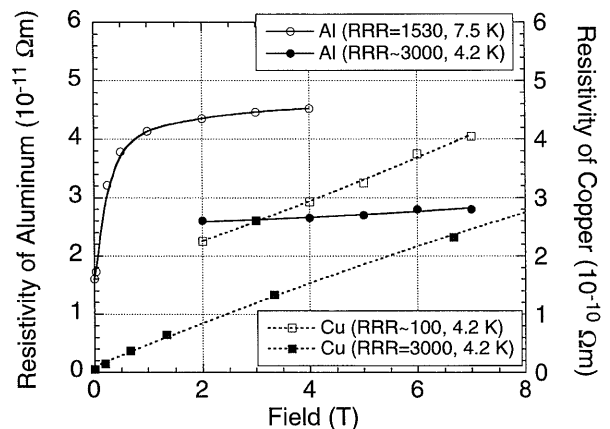


Fig. 3 Magnetoresistivity of copper and aluminum.

る[18].

LHDのヘリカルコイル導体は、Fig.4に示すように、超伝導撚線と平行に高純度アルミニウムの安定化材が配置され、それらの周囲は強度部材としての銅シースで囲われ、電氣的・熱的な接触の改善のために半田で含浸されている。また、アルミニウムと銅とは適合する半田が異なる問題の解決のために、アルミニウムは銅系のクラッド材で囲われている。超伝導撚線が常伝導に転移した際には輸送電流は主に高純度アルミニウム安定化材を流れるが、そこにホール電場が生じ、銅シースや超伝導撚線を介して断面内にホール電流が流れて磁気抵抗を増大させる。さらに、銅のホール係数はアルミニウムのホール係数と符号が逆なので、銅シースに生じるホール電場はこの断面内電流を増やす方向に生じて磁気抵抗がさらに増大する[19]。LHDヘリカルコイル導体では、最初はクラッド材に銅が使用されたが、7Tでは導体の平均抵抗が外部磁場なしの場合の7倍以上にも増大した[20, 21]。この磁気抵抗を抑制するためにクラッド材をCu-10%Niに変更してホール電流を流れ難くしたら、輸送電流が超伝導線から安定化材へ転流する際の発熱が大きくなり過ぎて低温端回復電流は向上しなかった。クラッド材の抵抗値だけでなく界面の接触抵抗を含めた実効的な横断抵抗を適正に選択する必要がある。最終的にCu-2%Niクラッドを採用することによって目標の低温端回復電流(13 kA, 7 T)を達成することができた。以下にホール電流による異常な磁気抵抗について定量的に説明する。

ホール電流による磁気抵抗は、導体断面をFig.4の波線で示すような集中定数回路に置き換えることによって簡易的な評価が可能となる[22]。この図は外部磁場が横方向の場合の電流回路を示している。この回路の起電力としてまずはアルミニウムのホール電場のみを考慮する。アルミニウムとクラッド材の電気抵抗を各々、 ρ^{Al} と ρ_{xy}^{clad} とおき、超伝導撚線と銅シースで構成される短絡回路の抵抗を R_{return} とおくと、横方向の外部磁場によって生じるホール電流回路の抵抗 $R_{H.C.}$ は次式で与えられる。

$$R_{H.C.} = \rho^{Al} \frac{b_1}{a_1} + \rho_{xy}^{clad} \frac{b_2 - b_1}{2a_1} + \rho_{con.} \frac{2}{a_1} + R_{return} \quad (5)$$

ここで、 $\rho_{con.}$ は、異種金属間の接触抵抗である。高純度アルミニウムとクラッド材は、円柱形状の高純度アルミニウムを円筒形状のクラッド材に差し込んだ状態で一緒に引き伸ばされるが、境界面の抵抗は無視できないと考

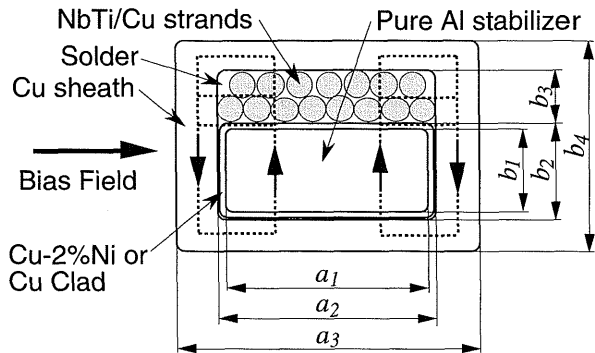


Fig. 4 A cross-section of LHD helical coil conductor and a Hall current circuit.

えられる。また、クラッド材の周囲には半田含浸または半田メッキが施されているが、この部分の接触抵抗も無視できない。アルミニウムのホール係数を R_H^{Al} 、外部磁場を B 、アルミニウム内の輸送電流密度を J_z^{Al} とおくと、アルミニウム安定化材のホール効果による起電力 V_H^{Al} は次式で与えられる。

$$V_H^{Al} = R_H^{Al} J_z^{Al} B b_1 \quad (6)$$

この断面内電流による追加のジュール発熱 P_H は、

$$P_H = \frac{V_H^2}{R_{H.C.}} = \frac{(R_H^{Al} B b_1)^2}{R_{H.C.}} J_z^{Al,2} \quad (7)$$

と表される。この発熱はアルミニウムに流れる輸送電流が原因であるから、アルミニウムの抵抗増加分 $\Delta \rho^{Al}$ による発熱とみなすことができ、次式が得られる。

$$\Delta \rho^{Al} = \frac{P_H}{a_1 b_1 J_z^{Al,2}} = \frac{(R_H^{Al} B)^2 b_1}{R_{H.C.} a_1} \quad (8)$$

銅シースに生じるホール電場による磁気抵抗についても同様の式が成立して、銅の抵抗増加分が求められる。各部材の並列回路として計算した導体平均抵抗率を短尺試料の実測値と比較してFig.5に示す。計算値は異種金属間の接触抵抗を変数として示してある。実測値は常伝導部が停留している時の値であり、複数の試料および測定位置毎の最大最小の範囲を示してある。実測値との比較から、Cu-2%Niクラッドでは接触抵抗が $2.0 \times 10^{-11} \Omega m^2$ 以下の範囲で変動していると推定される。クラッド材が銅の場合は接触抵抗が小さく、Cu-10%Niの場合にはさらに数桁大きな接触抵抗が存在したと考えられており[22]、クラッド材の界面抵抗には材質の違いによる加工

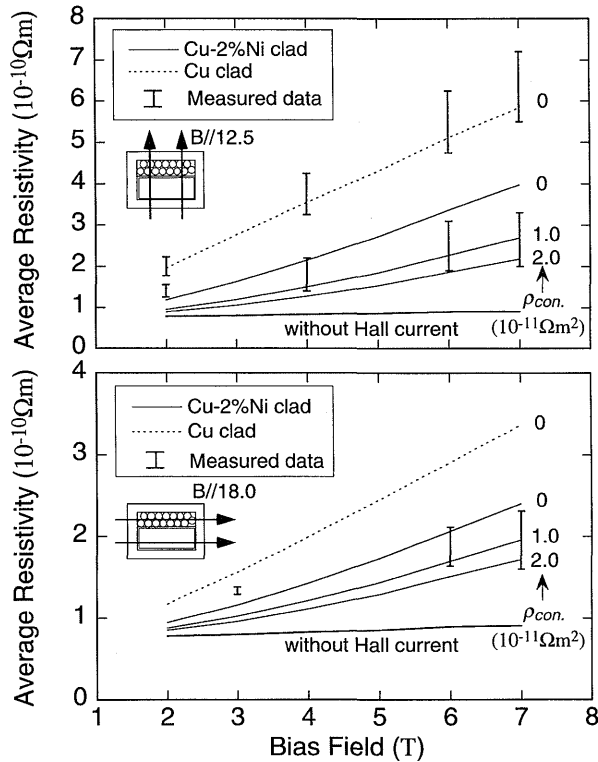


Fig. 5 The calculated average resistivity of LHD helical coil conductor at 4.2 K in considering the contact resistivity.

性が影響していると考えられる。このような複合導体の場合には接触抵抗の管理も重要な課題となる。

4.2 低抵抗安定化材における電流拡散遅れ

超伝導線が常伝導状態に移ると、超伝導線を通っていた輸送電流は周囲の安定化材に転流するが、この電流拡散は磁場変化を伴うために所定の時間遅れを伴う。これは交流用導体等でよく知られている表皮効果と同じ現象であるが、超伝導線の冷却安定性への影響が確認されたのは最近になってからである。1990年頃に米国で開発が試みられた超伝導電力貯蔵 (SMES) 用の 50 kA 導体は、高安定な設計の導体であったのに、低温端回復電流の半分の電流値で有限長の常伝導部が伝播する現象が観測された[23]。円形断面の純アルミニウムの周囲に NbTi 素線が配置されており、輸送電流は自己インダクタンスが増加する内側に向かって拡散する形状であった。このため拡散時間がさらに長くなり、常伝導部の先端での発熱が大きくなったことが原因であった。

同時期に開発が行われた LHD ヘリカルコイル導体でも、Fig. 6 に示すように、ヒータ加熱で常伝導部を生成する際に、立上がりの電圧が高くて固有の時定数で一定値に減衰することが実験で観測されていた。高純度アルミ

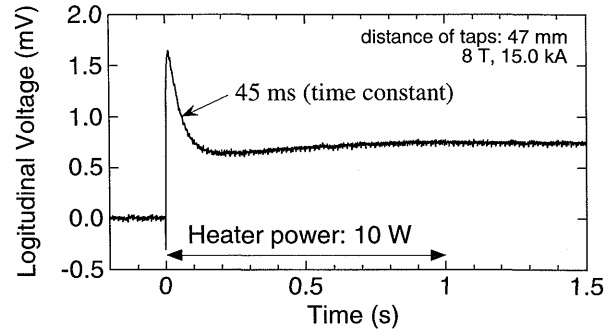


Fig. 6 Longitudinal voltage drop of LHD helical coil conductor after initiating a normal zone by heater.

ニウムへの電流拡散の問題も議論の対象になったが、当時はホール電流低減が最重要課題であったことと SMES 導体とは構成が異なっていたため、深刻な問題とは考えられなかった。その後、実機製作と並行して行われた動的な安定性解析によって、高純度アルミニウム安定化材に電流が拡散する間 (~0.1 s) の高い発熱密度によって低温端回復電流以下でも伝播が生じ得ることが指摘された [24, 25]。この導体では超伝導燃線と安定化材は横並びに配置されているので、電流拡散を 1 次元問題として評価すると、電流拡散時定数 t_m は次式で与えられる。

$$t_m = \frac{\mu_0}{\pi^2} \frac{d^2}{\rho} \tag{9}$$

ここで、 d はアルミニウムの厚さである。電流拡散時間は厚さの 2 乗に比例するため、大型導体になれば顕著に長くなり、冷却安定性への影響が無視できなくなる。実機コイル 1 層目を模擬した 10 ターンの円形コイル試験体および円形導体試料を製作して追加の特性試験を行ったところ、Fig. 7 の実線に示すように低温端回復電流よりも 3 kA 程度も低い電流値において常伝導部の拡大伝播が起り得ることが判明した。実機ヘリカルコイルでは 11.4 kA 付近において常伝導伝播と回復が繰り返して観測されているが、この「動的な最小伝播電流」近傍で発生していると考えられる。

これは動的な現象であるが、この導体の電流拡散時定数は 45 ms 程度であり、導体の熱時定数に比べると十分に長いので、式 (4) を適用した考察は可能であると考えられる。電流拡散途中では導体抵抗が実効的に高くなるので、この発熱を考慮した熱平衡は Fig. 8 のように表される。常伝導部先端の発熱が増大しているために低温端回復電流よりも低い電流値で「発熱 > 冷却」となり、常伝導部が拡大伝播してしまう。Fig. 8 には模式的に示し

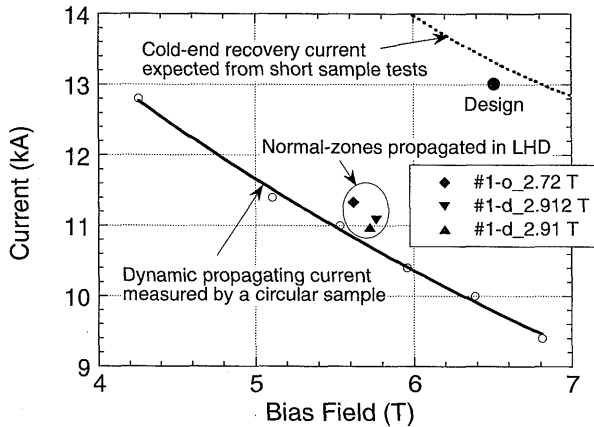


Fig. 7 Deterioration of the minimum propagating current of LHD helical coil conductor by slow current diffusion into a pure aluminum stabilizer.

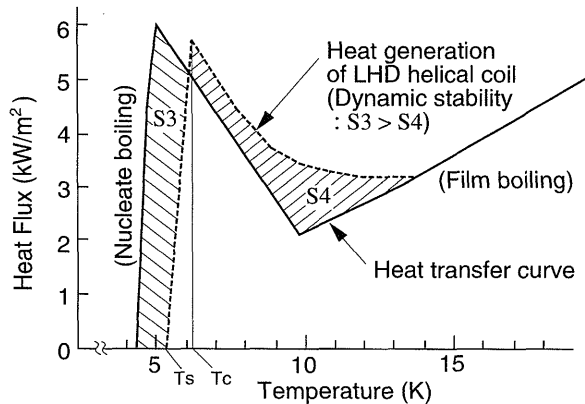


Fig. 8 Equal-area diagram for the dynamic stability of pool-cooled conductors with slow current diffusion into a stabilizer.

たが、電流拡散遅れに伴う発熱は導体温度に依存するものではないので、この方法は「動的な最小伝播電流」の具体的な評価には使えない。有限要素法や差分法を用いた動的な数値解析[26]が必要であり、熱伝達の過渡特性や初期条件等の与え方には研究課題が残されている。安定化基準の一般化はこれからの課題である。

5. 浸漬冷却型導体の大型コイルへの適用について

5.1 導体大型化の問題点と対策

印加電圧の軽減および機械剛性の向上のためには巻線数は少ない方がよいため、大型コイルには大型導体が相応しい。2.1節で述べたように、大型の浸漬冷却導体は相対的に冷却が不利になるため、電流密度の低下、表面処

理やフィン追加による冷却性能改善、あるいは、低抵抗安定化材の採用等の工夫が必要となる。もう1つの課題は超伝導線の配置である。安定化材との電氣的・熱的接触を良くするためには接触面積を広くすることが必要なので、超伝導線の分散配置等の工夫が必要となるが、その場合には電流の偏流や素線間結合損失の増加の問題が生じる恐れがある。特に変動磁場が大きい場合には系統的な研究が残されており、複雑な構造にすると製造コストが高くなるので、簡素化も重要な課題である。

低抵抗を追及すると金属の純度を高めることになって機械強度が低下するため、強大な電磁力が働く大型導体の場合には補強材が必要となる。低抵抗金属を補強材で囲むとホール電流が流れて磁気抵抗が増大する問題がある。また、安定化材が大型になるとホール電流が増大し、さらに電流拡散遅れによる発熱も問題となってくる。これらの対策としては、低抵抗安定化材を細分化して超伝導線の周囲に分散配置することが有効と考えられる。もう1つの方法としては、Ni等の添加によって機械強度を強化したアルミニウムを安定化材に採用することが考えられる。RRRは小さくなるが、磁気抵抗が小さいので、高磁場中では銅の数分の1の抵抗率と加工硬化銅なみの機械強度を同時に達成することも不可能ではない。

溝やフィンの追加によって有効冷却面積を拡大する場合には、これらに応力集中が生じないように巻線構造を設計する必要がある。電磁力が主にフープ力であるようなコイルでは、荷重の小さい側面に採用することにより機械強度との両立が可能となるので有効な方法である。

5.2 大型コイルへの適用可能性

浸漬冷却型では冷媒を強制循環しないので、大型コイルになっても圧損や冷媒温度の上昇は問題にならない。機械強度と冷却性能の両立が最大の課題になると思われる。変動磁場が大きい場合には、超伝導線の結合損失だけでなく、コイル容器を含めた常伝導部材の渦電流の低減も重要な課題となる。浸漬冷却型コイルでは電気絶縁耐力を大きくすることは容易ではないので、導体の大型化と並行してコイルの分割が有効である。分割して個々に保護回路を設ければ、印加電圧は分割数分の1に低減される。浸漬冷却型の場合には、冷媒の流れ方向を電流方向とは無関係に設定できるので、大型コイルに適した新しいコイル構造が見つかる余地があるように思われる。自由な発想からの研究が必要と考えられる。

6. まとめ

核融合炉用の超伝導コイルの特徴は、大型かつ高磁場

が要請されることである。しかも設置空間の制約から高い電流密度を要請されるため、超伝導導体の冷却安定性と機械強度の両立は容易ではない。また、印加電圧の抑制と機械強度の向上のためには大電流導体が必要となるが、浸漬冷却型の場合に導体を相似形で大きくすると冷却が不利になるため、冷却面積の拡大や抵抗発熱の低減対策が必要になる。LCT計画では、経験磁界8 Tの10 kA級の導体が開発された。LHDヘリカルコイルではそれ以上の大電流化をめざして高純度アルミニウムを安定化材に用いた複合導体を開発したが、小型導体ではあまり問題にならなかった2つの電磁現象、すなわち、ホール電流と電流拡散遅れによる発熱増加のために冷却安定性の低下が観測された。ケーブル・イン・コンジット導体ではすでに50 kA級が開発されているのに対して、浸漬冷却型で同等の性能を達成するためには独創的な発想と系統的な研究開発が必要である。しかしながら、浸漬冷却型には冷媒の強制循環が不要という受動的安全性が備わっており、その特長を生かした新しいコイル構造の研究の重要性は失われていない。

謝辞

本解説の中心となっているLHDヘリカルコイル導体は核融合科学研究所の低温グループが中心になって開発されたものです。三戸利行博士と柳長門博士との議論が電磁現象の理解に役に立ちました。この場を借りて感謝いたします。

参考文献

- [1] D.S. Beard *et al.*, Fusion Eng. Des. 7, 1 (1988).
- [2] T.A. Kozman *et al.*, IEEE Trans. Magn. MAG-19, 859 (1983).
- [3] 中村幸男他：九州大学応用力学研究所所報 60, 319 (1984).
- [4] A. Trossian, Fusion Eng. Des. 20, 43 (1993).
- [5] N.A. Chernoplekov, Fusion Eng. Des. 20, 55 (1993).
- [6] H. Tsuji *et al.*, Fusion Eng. Des. 55, 153 (2001).
- [7] N. Mitchell and E. Salpietro, Fusion Eng. Des. 55, 171 (2001).

- [8] 特集「大型ヘリカル装置 (LHD) 計画」プラズマ・核融合学会誌 Vol. 74 Supplement (1998).
- [9] J. Sapper and W7-X Technical Group, Fusion Eng. Des. 20, 23 (1993).
- [10] G.S. Lee *et al.*, Fusion Eng. Des. 46, 405 (1999).
- [11] H. Hosono *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. 11, 2014 (2001).
- [12] B. Turck, IEEE Trans. Magn. 32, 2264 (1996).
- [13] S. Imagawa *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. 10, 606 (2000).
- [14] B.J. Maddock *et al.*, Cryogenics 9, 261 (1969).
- [15] T. Ito and H. Kubota, Fusion Eng. Des. 20, 319 (1993).
- [16] Handbook on Materials for Superconducting Machinery, National Bureau of Standards, MCIC-HB-04 (1974).
- [17] J.P. Egan and R. W. Boom, Adv. Cryogenic Eng. 36, 679 (1990).
- [18] P.W. Eckels *et al.*, Cryogenics 29, 748 (1989).
- [19] H. Kaneko and N. Yanagi, Cryogenics 32, 1114 (1992).
- [20] T. Mito *et al.*, Fusion Eng. Des., 20, 233 (1993).
- [21] N. Yanagi *et al.*, Adv. Cryogenic Eng. 40, 459 (1994).
- [22] S. Imagawa *et al.*, Adv. Cryogenic Eng. 40, 469 (1994).
- [23] M.J. Pfothenauer, Cryogenics 31, 538 (1991).
- [24] S. Noguchi *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. 9, 624 (1999).
- [25] N. Yanagi *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. 9, 1113 (1999).
- [26] N. Yanagi *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. 10, 610 (2000).



いま がわ しん さく
今川 信作

1983年京都大学工学部原子核工学科卒業。
同年4月株式会社日立製作所入社。1991年
4月核融合科学研究所大型ヘリカル研究部
助手、1997年10月同助教授。主として大型
超伝導コイルと極低温構造物に関する研究に従事。趣味はテ
ニスと山歩き（最近はそのトレーニングのためのジョギング
止り）。家族は妻と子ども2人。