

解説

核融合装置用超伝導コイルの電磁現象 —強制冷却型超伝導コイル—

濱田 一 弥, 小 泉 徳 潔
(日本原子力研究所那珂研究所)

Electromagnetic Phenomenon in Superconducting Magnet for Fusion Facility
— Forced Flow Superconducting Magnet —

HAMADA Kazuya and KOIZUMI Norikiyo

Naka Fusion Research Establishment, Japan Atomic Energy Research Institute, Ibaraki 311-0193, Japan

(Received 3 April 2002)

Abstract

In the design of the International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER), a forced flow cooled, Cable-In-Conduit Conductor (CICC) is selected for its magnet system because of its superior performance in withstanding voltage (>10 kV) and, more importantly, its mechanical stiffness against large electromagnetic forces. The CICC consists of about 1,000 superconducting strands enclosed in a steel jacket, and due to this configuration, the CICC exhibits a characteristic electromagnetic phenomena which can be a cause of the instability of a conductor. Extensive studies were performed, especially on ac losses, stability, and current imbalance among the strands in order to understand the phenomena and to provide a design basis for CICC to be used in large superconducting magnets. This paper describes the work on developing the CICC including analytic studies regarding the realization of fusion magnets.

Keywords:

superconducting magnet, stability, cable-in-conduit, ITER, CS model coil, DPC, supercritical helium, LCT

1. はじめに

近年、磁場閉じ込め式核融合炉の実現をめざして、大型超伝導コイルの開発が、国際協力によって精力的に進められてきた。特に、国際熱核融合実験炉(International Thermonuclear Experimental Reactor: ITER) 工学設計活動(Engineering Design Activities: EDA) [1, 2]では、トロイダル磁場(TF)コイルと中心ソレノイド(CS)コイルの技術開発を目的として、日本、欧州連合、ロシアおよび米国が協力して、モデル・コイルの試作を行い、目標どおりの成果を収めてきた[3, 4]。ITER 超伝導

author's e-mail: hamada@naka.jaeri.go.jp

コイルは、液体ヘリウム温度(約 4.5 K)で動作する NbTi や Nb₃Sn 超伝導材料を使用し、直径 1 mm 程度の超伝導素線を約千本束ね合わせたケーブルを、強固な金属製保護管(ジャケット)に挿入した[5]、ケーブル・イン・コンジット導体(Cable-in-Conduit Conductor: CICC)をコイル状に巻線成型する方式を採用している。CICCの開発は、約30年の歴史があり、大型コイルのR&Dの積み重ねを経て、ITER 超伝導コイルを実現する技術レベルに到達することができた[5-7]。強制冷却型超伝導コイルにおいては、超伝導特有のゼロの電気抵抗や反磁性とい

う性質に、CICC特有の複雑な構造により、多様な電磁現象が発生する[8]。そして、最近特に解明に労力が注がれているのは、導体内部に発生する不均一電流による不安定性や変動磁場で発生する導体の変動磁場損失である[9-11]。

本稿では、2章において現在の核融合炉設計における強制冷却型超伝導コイルの必要性とCICCの構造について、過去の開発例を踏まえて述べる。3,4,5章では、ITER超伝導コイルを実現するために必要となったCICCの開発において課題となった電磁現象である、超伝導素線のヒステリシス損失、変動磁場損失ならびに導体内部での不均一電流に起因する通電性能の低下現象(不安定性)についてその対策を交えて紹介する。

2. 強制冷却型コイルおよび導体の開発の進展

2.1 強制冷却型コイル

ITER等核融合実験炉に使用する超伝導コイルは、大型であるのと同時に、大電流(4万アンペア以上)、高磁場(10テスラ以上)、高電圧(1kV以上)での動作が要求される。液体ヘリウムに直接浸す浸漬冷却コイルを使用した場合、コイルはヘリウムが流れる隙間を持つので、ITERに要求されるような電磁力を支える剛性を得ることは困難である。また、対流熱伝達を促進する観点から絶縁材を厚くすることができない。一方、強制冷却型コイルでは、超伝導線材を束ね合わせたケーブルを強固なジャケットに挿入したCICCを使用し、ジャケット内部に冷媒を流して、直接冷却するので、ジャケットの外周を全面にわたり絶縁することができる。したがって、高い絶縁性能と高い剛性を両立するコイルの設計が可能である[6,7]。

強制冷却型導体は、ヘリウムを循環させる大規模な冷凍システムが必要であり、大型コイルに使用されることが多い。そのため、冷却流路の単長は数百メートルに及ぶことがある。この時、液体ヘリウムを冷媒として使用した場合、流れの途中で熱による気化が発生し、気液二相流状態となり、熱伝達の低下、流動抵抗(圧力損失)の増大、気化による流路の閉塞等の可能性がある。そこで、通常、強制冷却型コイルでは、急激な相変化のない超臨界ヘリウムと呼ばれる臨界圧力以上(約0.6~1MPa)に加圧したヘリウムを冷媒として使用する[12]。

2.2 強制冷却型導体の構造

主な強制冷却型導体の例を、Fig.1に示す。
ケーブル・イン・コンジット導体(CICC)[13]:直径1mm程度の超伝導素線(Strand)を数百から千本を撚っ

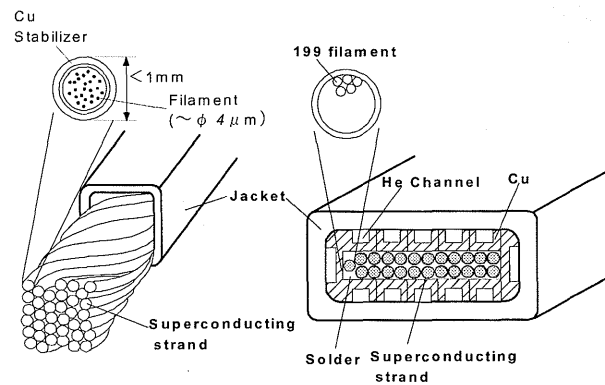


Fig. 1 Typical force flow conductor, CICC(left) and Hollow type(right).

てケーブル状にしたものを、円形または矩形の金属管(ジャケット)に挿入したものであり、ジャケットは電磁力を支持するとともに、冷媒の圧力容器となる。超伝導素線は、直径数ミクロンの数千本のフィラメントが安定化銅(Cu Stabilizer)の中に埋め込まれている。これは、常伝導転移した時、電流が低抵抗の銅に流れて超伝導線が焼損しないように保護するためである。素線間の接触抵抗を高くし素線間を渡る電流を低減することによって、変動磁場損失を低くすることができ、導体内での発熱は、撚線の隙間を通るヘリウムによって速やかに除去される。

ホロー型導体[14,15]:超伝導線が安定化銅ブロックに埋め込まれた導体がジャケットに挿入された構造であり、超伝導素線は安定化銅を介して冷却される。ホロー型導体は超伝導導体がジャケット内で固定されているので、剛性が高くとれる利点がある。一方、CICCに比べて、構造上、安定化銅に生じる変動磁場による渦電流損失の低減対策が難しいことや、ヘリウムとの接触長さがCICCよりも小さく除熱性能の観点からの不利があるなど、直流コイルに適した導体である。

ITERでは、超伝導コイルが交流運転あるいは変動磁場下での運転を行うので、低い変動磁場損失を利点とするCICCが使用される設計となっている[1]。

2.3 CICCの大型コイルへの応用

2.3.1 LCTコイル[15]

CICCが大型コイルに本格的に使用されたのは、Large Coil Task(LCT)プロジェクトからである。

LCTプロジェクトではTFコイルを模擬したD型コイルが合計6個製作された。LCTコイルの外観はFig.2に示すとおりであり、外略寸法は、高さ4.5m、幅3.6m、最大重量は約40tonである。それぞれのコイルの導体形

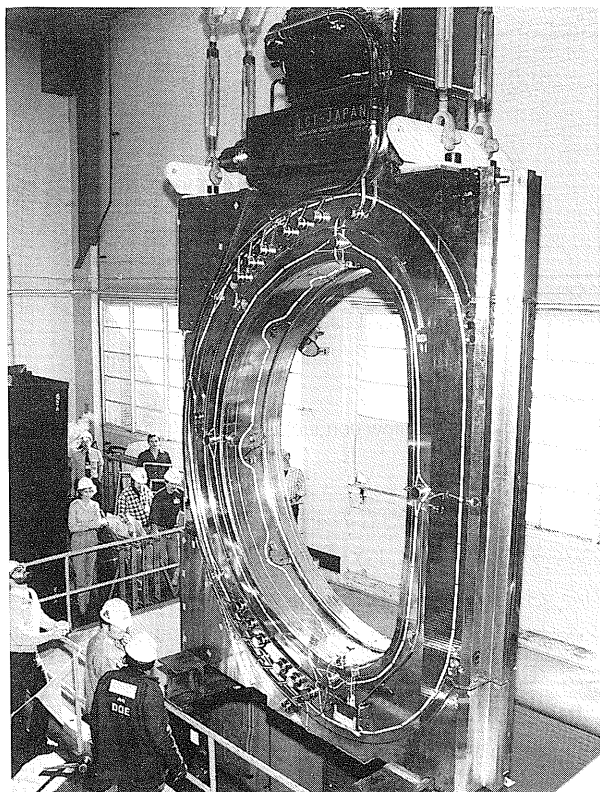


Fig. 2 Japanese LCT Coil.

状や冷却方法は異なり、日本は、NbTiを使用した浸漬冷却型導体を使用してコイルを1個製作し10.2 kAで8 Tを発生した。6個のコイルは、トロイダル状に並べられて、1986年1月に試験が開始された。6個のコイルの総合励磁では全コイルが9 Tを発生し、大型TFコイルを製作するための超伝導工学技術が実証された。

6個のLCTのうち3個は強制冷却型コイルであり、1つのコイル(Westinghouse社)にCICCが採用された。CICCは、20.8 mm角のステンレス製ジャケットに直径0.7 mmのNb₃Sn超伝導素線が486本燃らされて挿入された構造である。LCT製作当時、Nb₃Sn超伝導素線や導体の製作技術はまだ十分ではなく、大型コイルへのCICCの使用は極めてチャレンジングではあった。しかし、本導体は、定格性能として温度3.8 K、電流17.76 kAにて8.2 Tを発生し、Nb₃Snを用いたCICCによる強磁場、大電流、高剛性、さらには高い除熱性能等を実証し、核融合炉用超伝導コイルへCICCを応用する研究の礎を築いた。

トカマク型核融合炉においては、プラズマ電流駆動やプラズマの位置、形状制御のためにポロイダル磁場は変動する。そのため、ポロイダル磁場(PF)コイル用CICCは、低い変動磁場損失性能を持つことが必要であ

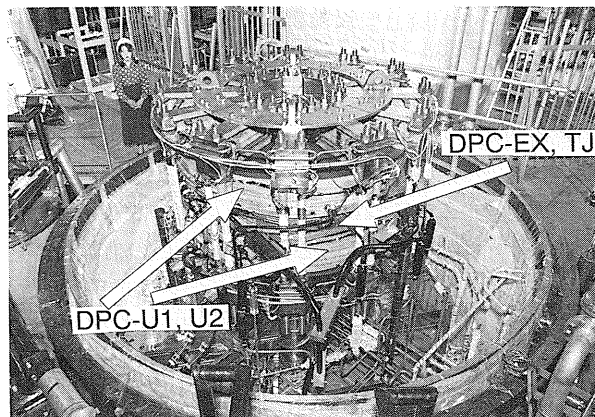


Fig. 3 Demo Poloidal Coil (DPC).

り、1980年後半からその開発が世界的に進められた。

2.3.2 実証ポロイダル・コイル計画[16]

LCTに引き続き、日本原子力研究所(原研)は、実証ポロイダル・コイル(DPC)計画を実施し、その中でPFコイルに必要とされるパルス通電が可能な大型CICCの技術開発を世界に先駆けて行った。DPC計画では、大型パルス・コイルを試作し、1989年から通電試験が行われた。Fig. 3にDPCの外観を示す。DPCは上中下3つのコイルから構成されており、上下はNbTiを用いたCICCを巻線したコイル(DPC-U1およびU2)である。中間にある試験コイルには、DPC-U1, U2コイルによって最大7 Tが印可され性能試験が行われ、7 T/sのパルス通電試験に成功した[17]。DPC計画では、試験コイルには様々な導体を用いた強制冷却型コイルが製作されて試験が行われた。Fig. 4に代表的な導体として、DPC-U, DPC-EX, DPC-TJ[18]の写真を、また、Table 1に各導体の主要なパラメータを示す。DPC-EXは、除熱性能の向上と圧力損失低減のために、撚線の両側にもヘリウムが流れる流路が設けられている。DPC-TJは二重ジャケット方式を採用している。これは、曲げ加工の比較的容易な薄肉ジャケットにまず撚線を入れてコイル状に曲げ加工して、その状態で超伝導生成熱処理を行い、最終的に電磁力を支持する構造体の溝に導体をはめ込んで、コイルに仕上げるといふ、TFコイル製作手法を模倣したものである。この概念は日本で開発され、ITERのTFコイル設計に応用されている。

DPC実験の結果、導体内部において、486本の各素線への電流配分の不均一性に起因する不安定現象が観測され[19]、変動磁場運転を行うコイルの設計における大きな課題となった。

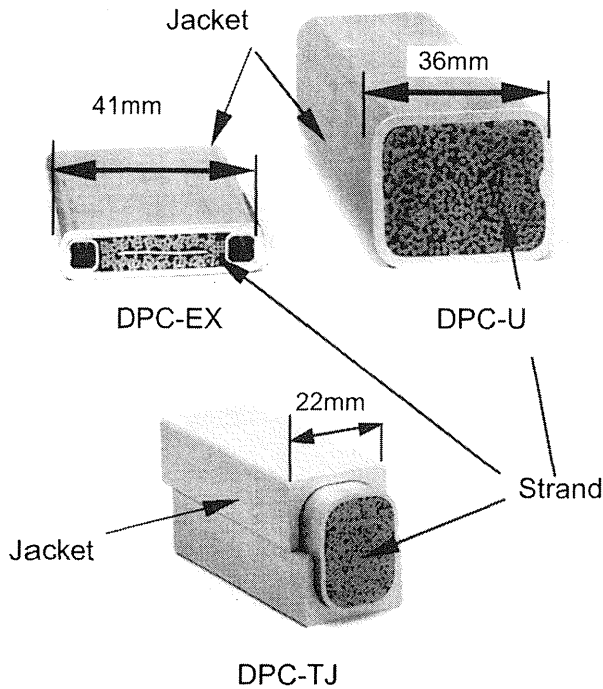


Fig. 4 CICC used in DPC.

Table 1 Specification of CICC for DPC-EX, U and TJ.

	DPC-EX	DPC-U	DPC-TJ
Material	Nb ₃ Sn	NbTi	Nb ₃ Sn
Design current/ Magnetic field	10 kA/7 T	30 kA/7 T	24 kA/ 12 T
Standard diameter	0.81 mm	1.12 mm	0.67 mm
Number of strand	1.53	486	486
Achieved pluse operation	7 T/s	7 T/s	DC

2.3.3 ITER CS モデル・コイルの開発

CSコイルはトカマクの中心に位置し、プラズマ電流をトランスの原理で誘導するために使用されるので、本コイルは磁場を変動させるパルス動作が要求される[1].

ITER EDA では、ITER の運転を模擬した条件で超伝導導体の性能を確認し、超伝導導体およびCSコイルの製作に必要な主要技術を実証することを目的として、国際協力によりCSモデル・コイルを開発した。モデル・コイルの開発は、1992年から開始され、9年をかけて、R&D、設計、製作を行い[3]、2000年に通電試験を行った[4]。断熱真空容器内に据え付けられたCSモデル・コイルの外観をFig.5に示す。また、CSモデル・コイル諸元をTable2に示す。重量は、コイルのみで約100tonであり、46kAで13Tを発生させ、さらに0.4T/sの励磁速

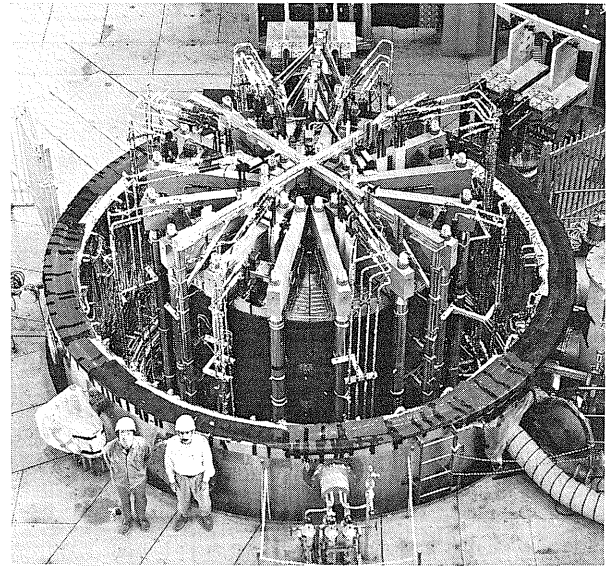


Fig. 5 ITER Central Solenoid Model Coil.

Table 2 Major parameters of CS Model Coil.

	CS Model Coil
Structure	18 Layers
ID/O.D	1.6 / 3.6 m
SC stand dia	0.81 mm
No of strand	1080 or 1152
Coil height	1.8 m
Current/Magnetic field	46 kA/13 T
Stored energy	640 MJ
Weight	100 ton
Pulse operation	0.4 T/s

度が要求される。この要求は、上述のLCT、DPC等の大型コイルの性能を遙かに凌ぐものであった。

CSモデル・コイルを開発するためには、多くのR&Dを必要としたが、特に電磁現象的な問題としては、主に以下のような課題を克服する必要があった。

①超伝導素線に関する問題

- 超伝導体の反磁性に伴うヒステリシス損失の低減
- 超伝導体のゼロ電気抵抗に伴う損失の低減

②CICCに関する問題

- 変動磁場損失の低減
- 電流偏流による不安定現象の回避

3章および4章では、以上の超伝導素線の電磁現象とCICCの電磁現象を説明する。そして、CSモデル・コイルに向けて、これらの現象に起因する問題を解決した方法についてDPC実験結果の検討を交えて紹介する。

3. 強制冷却超伝導導体の電磁現象

3.1 超伝導素線内の電磁現象

3.1.1 超伝導体の反磁性に伴うヒステリシス損失

超伝導体は内部への磁場の侵入を嫌う反磁性を示す[7]。鉄などの強磁性体が変動磁場を受けるとヒステリシス損失が発生するのと同様に、超伝導体もその反磁性のために、ヒステリシス損失が発生する[7]。強制冷却型超伝導体では、冷媒を流して導体を冷却するが、ヒステリシス損失のように、超伝導線が全長にわたって発熱すると、冷媒導入部から遠い下流部では、冷媒が流れる間に熱が蓄積して、温度上昇が大きくなる。このため、ヒステリシス損失が大きい場合は、冷媒温度が、超伝導状態が壊れ始める温度を超えるまで上昇し、常電導転移が起こり、熱的暴走(クエンチ)に至ってしまう。

超伝導体の反磁性は、磁場の侵入を打ち消すように流れる超伝導電流に起因するため、超伝導状態で流せる限界の電流値、すなわち臨界電流値が高いほど、ヒステリシス損失は大きくなる。また、超伝導線の直径が太いほど、磁化が大きくなって、ヒステリシス損失が増大する。超伝導体を使用する立場からは、明らかに、臨界電流値が高い方が望ましい。そこで、通常は、超伝導体を極細フィラメント化する技術が採用される。すなわち、Fig. 6に示すように、超伝導フィラメントを、銅あるいは銅合金の母材に埋め込んだ構造が採用されている。

3.1.2 超伝導体のゼロ電気抵抗に伴う損失

銅母材に埋め込んだ超伝導フィラメントが、Fig. 7に示すように直状であり、素線が素線軸と直交する方向の変動磁場を受けた場合に起こる電磁現象について、2本のフィラメントをモデルに考えてみる。

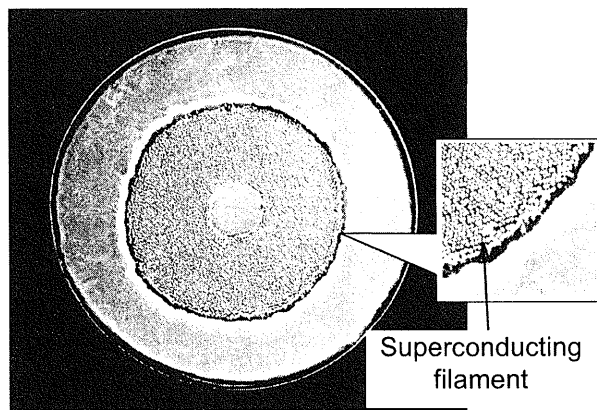


Fig. 6 Cross-sectional view of a Nb₃Sn multi-filament superconducting wire, which was developed in ITER-EDA.

フィラメントは、銅あるいは銅合金に覆われているために、フィラメント間には電気抵抗が存在する。よって、これらのフィラメントの等価回路は Fig. 8 に示すような分布定数系回路となる。また、これらのフィラメント間を磁束が鎖交するため、磁場が変動すると、鎖交磁束の変動を打ち消すように、循環電流[7]が誘起される。この超伝導フィラメント間(後述の超伝導線間も含めて)の磁氣的結合のために誘起される循環電流を、特に、結合電流 i_c と呼ぶ。この結合電流 i_c [A] に対する支配方程式は、

$$L \frac{\partial i_c}{\partial t} + \frac{1}{G} \frac{\partial^2 i_c}{\partial x^2} - \frac{\partial \phi}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

となる。ここで、 G [S/m] は単位長さあたりのフィラメント間のコンダクタンスを、 L [H/m]、 ϕ [Wb/m] は、単位長さあたりのフィラメント対が作るループのインダクタンス、および、鎖交磁束を表す。ここでは、(1)式の解を正確に求めることは省略するが、その解から、結合電流

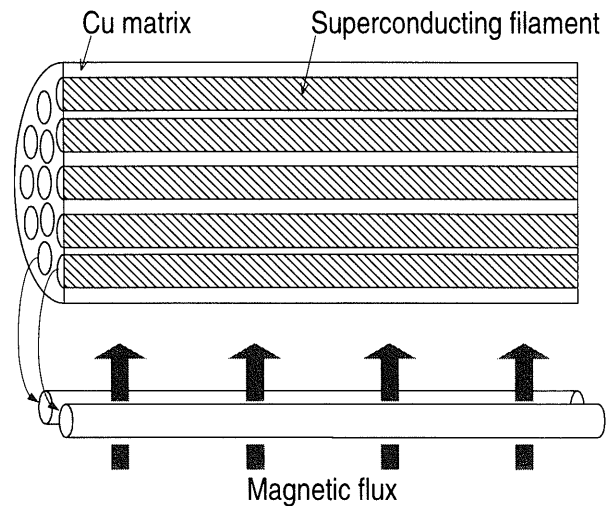


Fig. 7 Illustration of multi-filament superconducting wire when the filaments are not twisted.

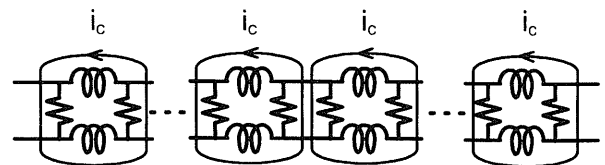


Fig. 8 Equivalent circuit model for analysis of coupling current induced among the filaments.

の減衰時定数 τ [s]のオーダーは、素線長を X [m]として、

$$O(\tau) \approx GLX^2 \quad (2)$$

となる[20, 21].

ITER 等で使用される大型コイルの超伝導線の長さは、通常、数百メートルのオーダーである。また、高い臨界電流値を得るために、銅あるいは銅合金中に、フィラメントを密に配置しているため、フィラメント間のコンダクタンスは大きい。よって、この結合電流の減衰時定数は極めて長いものとなり、変動磁場を受けた場合に、超伝導電流のように、ほとんど減衰することなく増加する。これは、フィラメント間に磁場を遮蔽するように超伝導電流が流れるのと等価である。したがって、超伝導体をフィラメント化しても、複数のフィラメントがあたかも1本の太い超伝導線のように振る舞ってしまい、変動磁場による損失(変動磁場損失)が大きくなる[8]。なお、このように結合電流の減衰時定数が長くなるのは、素線軸方向の電気抵抗がゼロであるために、抵抗が小さい大きなループが形成されたためである。

このような変動磁場損失は、結合電流の減衰時定数を短くすることで低減できる。その有効な手法としては、素線に捻り(ツイスト)を加えて、フィラメントを撚線化する方法である。これによって、簡単に説明すると、Fig. 9に示すように、撚線化したループの半ピッチごとに結合電流が誘起されるようになり、(2)式の X^2 の項が十分に小さくなる。実際に、通常のツイスト・ピッチは数十ミリメートルであり、減衰時定数のオーダーは、ツイストしない場合の約 $1/10^8$ となる。

3.2 CICCの電磁現象

3.2.1 CICCの撚線構造

CICCは、多数の超伝導素線を集合させて導体を構成している。この時、超伝導素線を撚り合わせないと、素線間のループを貫く鎖交磁束を相殺するように大きな循環電流が誘起される。したがって、素線を撚り合わせる必要がある。

しかし、超伝導素線の場合と同様のツイストを行うと、Fig. 10(a)に示すように、内側にある素線は常に内側に、外周側にある素線は常に外周側に位置することになる。この場合、内側の素線群と外周側の素線群が作る導体軸方向の磁場が結合して、外周側の素線群には過大な電流が流れ、導体断面で不均一な電流配分(電流偏流)が発生してしまう。そのため、一部の素線が、過大な電流を流すと、導体の通電電流値を素線本数で除した平均素線電流値としては、臨界電流値に対して十分な裕度を有

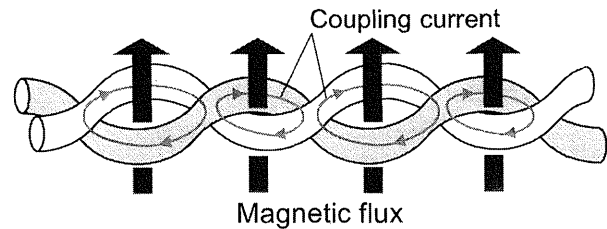


Fig. 9 Illustration of coupling current induced among the twisted filaments.

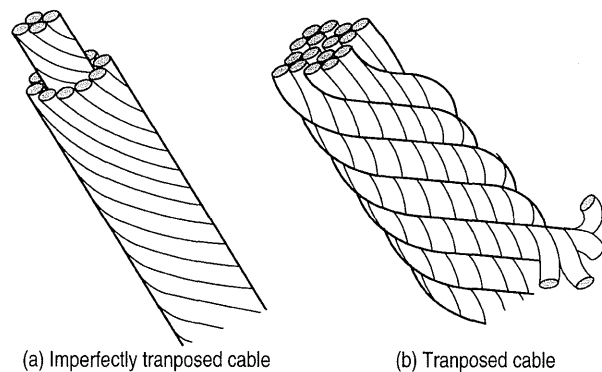


Fig. 10 Twisting of (a) imperfectly transposed and (b) transposed cable.

していても、過大電流が臨界電流値を超えて常伝導転移し、この素線からのジュール発熱によってコイルのクエンチに至ることがある[9, 10].

したがって、CICCでは、すべての素線配置が互いに対称となるように、例えば、Fig. 10(b)に示すように、最初に素線を3本撚り合わせ、さらにこれらを複数(3~6)本撚り合わせ、これを必要回数繰り返す多段の撚線化を行う。

3.2.2 CICCの変動磁場損失

ITERで使用される大電流導体では、導体径が大きいため、撚線を行った場合でも、素線間を貫く鎖交磁束の絶対値が大きくなる。このために、(1)式からもわかるように、大きな結合電流が誘起されやすくなる。この結合電流が素線間を横断するとき、接触抵抗のために発熱して損失が生じる。そこで、変動磁場中で使用される導体では、この結合電流を小さくする必要がある。その最も有効な方法は、素線間を電氣的に絶縁することである。

3.2.3 CICCの電流偏流

2章で述べたDPC計画[16]で開発したNbTi導体を用いたDPC-Uコイル[19]のCICCでは、素線表面をフォルマル被覆して素線間を電氣的に絶縁し、結合電流によ

る変動磁場損失を解消することができた。その一方で、Fig. 11 に示すように、コイルが定格値の約40%の磁場でクエンチするという不安定現象が新たに発生した。このときのクエンチ電流値は、素線の臨界電流値を素線本数倍した予想臨界電流値の約1/20の極めて低いものであった[19, 22]。

フォルマル被覆した導体では、前述のように、非対称な撚線化を行うと電流偏流に起因する不安定現象が発生することが報告されていた[9, 10]。しかし、Fig. 10(b) に示すように多段の撚線化を行って、素線配置が互に対称となるようにした場合には、電流偏流は発生しないと考えられていた。さらに、電流偏流の大きさが、これまでに報告されていたものに比べて1桁程度大きくないと、DPC-U コイルの不安定現象を説明できなかった。

そこで、著者らによって、新たな電流偏流の発生要因が考察された。DPC-U コイルでは、4本のCICCで4個のダブル・パンケーキ・コイルを製作して、これらを積層して1つのコイルとしているために、導体内の全素線が各コイル要素の端部で低電気抵抗にて接続されて、多数の素線が端部を介したループを形成している。通常の撚線化は、これらのループを鎖交する磁束の総和をゼロとすることを目的として行われるが、ループに鎖交磁束の相殺の崩れが生じた場合は、超伝導線がゼロ電気抵抗であるために、Fig. 12 に示すように、磁場変動に対して鎖交磁束の総和をゼロとするように循環電流が誘起される。この循環電流と通電電流が重畳して、電流偏流が発生する。このように、鎖交磁束の相殺の崩れが電流偏流の原因となる場合は、他のコイル要素や他のコイルが作る磁場(外部磁場)が循環電流を大きくする。実際に、素線間が絶縁されていることを踏まえた集中定数回路モデルの解析の結果、循環電流の大きさは、次式で表されることがわかった。

$$i_c = \frac{\Delta\Phi}{LX} = \frac{\Delta\Phi_{sf} + \Delta\Phi_{ex}}{LX} \quad (3)$$

ここで、 $\Delta\Phi$ [Wb]は、鎖交磁束の相殺の崩れを、下付きのsf, ex は、それぞれ、コイル要素単体で作る磁場(自己磁場)、および外部磁場による値であることを表す。

DPC-U コイルでは、(3)式より外部磁場の影響を評価すると、外部磁場のために、循環電流が1桁大きくなっていることがわかった。また、詳細な解析の結果、DPC-U コイルで発生した大きな電流偏流は、撚線の乱れとしては、自己インダクタンスのばらつきに換算して、1/1,000程度の小さい乱れであることもわかった[22]。な

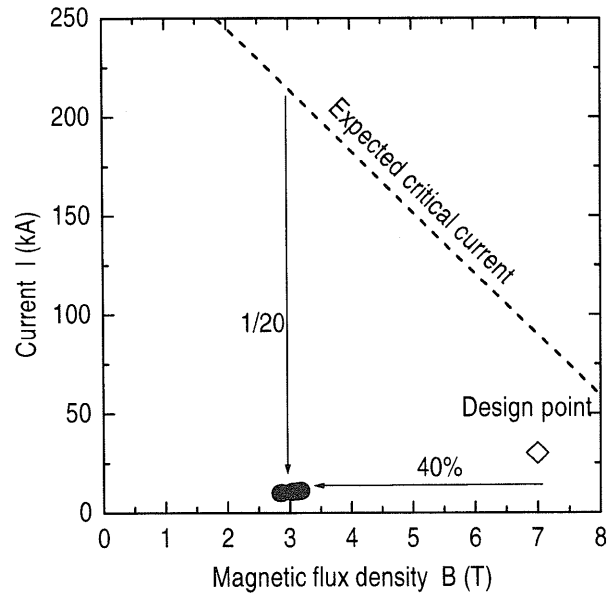


Fig. 11 Quench currents of DPC-U coil.

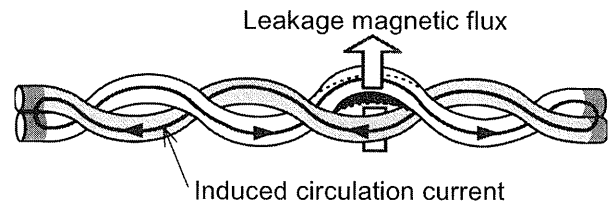


Fig. 12 Induced circulation current due to deviation of cabling.

お、通常の撚線方法では、このような小さな撚線の乱れを防ぐことは困難であり、大型コイルにおける電流偏流の発生は不可避である。

また、DPC-U コイルが、電流偏流のためにクエンチに至ったメカニズムは、以下のように説明できる[16]。電流偏流のために過大な電流を流す素線が、常電導転移すると、その常電導抵抗のために、循環電流が減衰する。循環電流が速やかに減衰する場合は、常電導転移した素線の電流値が、急激に低下し、臨界電流値より小さくなって超伝導復帰する。しかし、DPC-U コイルでは、素線間が絶縁されているために、循環電流は端部を迂回する大きなループに誘起され、その減衰時定数が長く、常電導抵抗が発生しても速やかに減衰しない。このため、長時間ジュール発熱が持続し、その間に冷媒温度が分流通開始温度を超えて上昇しクエンチに至る[19]。

4. 強制冷却導体の安定化

4.1 変動磁場損失の低減

ITER EDA 開始当時は、ヒステリシス損失と臨界電流密度双方ともに ITER の要求値を満足する超伝導線の製造技術が開発されていなかった。これは、低ヒステリシス損失と高臨界電流密度が、3章で述べたように、相反する関係にあるためである。両者を両立させるためには、超伝導フィラメントを極細化することが有効であることがわかったが、極細化のためには、超伝導線の加工度を大きくする必要があり、製造時に断線などの問題が発生した。ITER EDA を通して、これらの技術的課題を克服し[7, 11]、低ヒステリシス損失と高臨界電流密度の超伝導線の製造が可能となった。また、ITER 工学設計活動で開発した素線では、ツイスト・ピッチを 20 mm まで短くすることに成功しており、フィラメント間の磁氣的結合による変動磁場損失も十分に小さく抑えられている[7]。

4.2 電流偏流による不安定現象の回避

フォルマル被覆したコイルでは、素線間が絶縁されているために、循環電流が速やかに減衰しなかった。このために、電流偏流に起因するクエンチが発生した。他方、素線間が絶縁されていない場合は、常電導抵抗が発生すると、その近傍で他の超伝導状態の素線に過剰な電流が乗移り、電流が速やかに減衰する(転流現象)。しかし、素線間の抵抗を低くすると、素線間を横断して、大きな循環電流が誘起され、変動磁場損失が大きくなる。そこで、素線間の電気抵抗を適度に小さくして、低変動磁場損失で、電流偏流による不安定現象が発生しない導体が開発された。具体的には、素線表面をクロム・メッキすることで、素線間のコンダクタンスを 1-100 kS/m 程度[23]とした。

このように素線をクロム・メッキしたコイルでは、その導体の予想臨界電流値まで安定に励磁することに成功した[17, 24]。ただし、高速の磁場変動に対しては、予想臨界電流値よりも低い電流値でクエンチする不安定現象が観測された[24]。これは、以下のように、説明された[20]。磁場の変動速度が速い場合は、循環電流を流そうとする誘導電圧も大きくなる。このため、過大電流を流す素線が常電導転移した場合でも、この誘導電圧のために、常電導転移した素線に電流が流れ続ける。そして、この素線からのジュール発熱に対して、導体が十分な安定度を有していない場合に不安定現象が発生する[20]。

そこで、CS モデル・コイルでは、電流偏流による不安定現象を回避するために以下のような工夫を行った

[4, 5]。

- (1)交流損失を低減しつつ、素線間での電流の転流を促進するように、素線表面にクロム・メッキを施し、素線間接触抵抗を最適化した。
- (2)高い安定度を確保するために、超伝導素線の銅比(銅部断面積/非銅部断面積)を大きく(1.5)するとともに、細い素線($\phi 0.81$ mm)を数多く束ねることにより、ヘリウムとの接触面積を増やして熱伝達を促進するようにした。

5. CS モデル・コイルの結果

3, 4章で述べたような電磁現象による問題を克服し、開発された CS モデル・コイル用 CICC を Fig. 13 に示す[25]。直径約 0.81 mm の Nb₃Sn 超伝導素線 1,152 本から成る撚線は矩形ジャケット内に挿入されており、ヘリウムは、素線の隙間と中心チャンネルを流れる。素線表面には厚さ 2.5 μ m のクロム・メッキが施され、サブケーブルにはインコネル・テープが巻かれ、超伝導素線間を渡る循環電流による変動磁場損失を低減する設計とした。CS

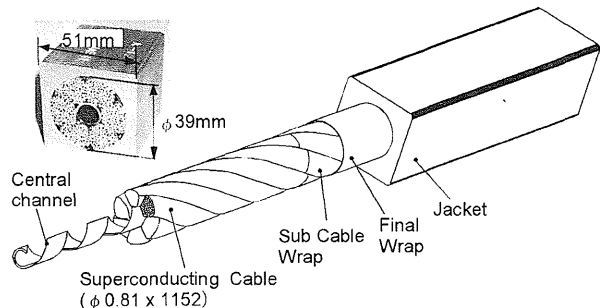


Fig. 13 ITER Central Solenoid Model Coil Conductor.

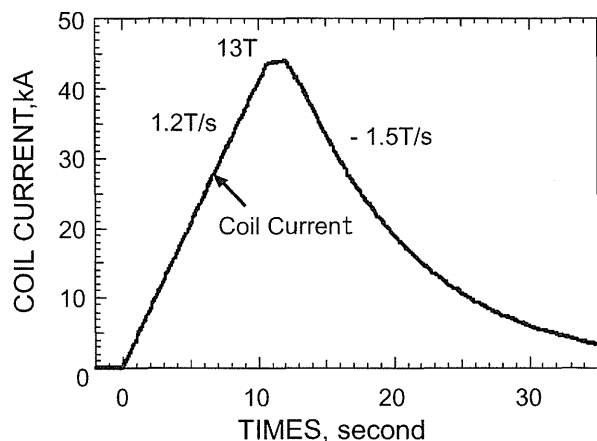


Fig. 14 Achieved pulsed operation of CS model coil.

モデル・コイルでは, Fig. 14 に示すように, 開発目標とした 0.4 T/s よりも速い 1.2 T/s の高速励磁に成功した [4, 5, 26].

6. まとめ

本稿では, 強制冷却型超伝導導体として CICC の構造と電磁現象について述べてきた.

LCT 以来, CICC は, 強磁場, 高耐電圧, 高剛性性能を必要とする核融合炉などの大型超伝導コイルに重要な技術であるという認識が強まった. 最近10年間で, ITER EDA や大型ヘリカル装置 (LHD), あるいは超伝導電力貯蔵コイルを初めとする研究者や各メーカー技術者の努力の積み重ねによって, 超伝導線材技術とともに, CICC の電流偏流による不安定性や交流損失等の電磁現象に対する理解が進んできた. 今後, CICC のメリットを生かして, 応用範囲がさらに広がっていくことを願ってやまない.

謝辞

本稿を執筆するにあたり, 原研那珂研究所超電導磁石研究室奥野 清室長を始めとする室員の皆様にご助言をいただきました. ここに謝辞を表します. また, 那珂研究所松田慎三郎所長, 核融合工学部関 昌弘部長, 関省吾研究主幹, 高津英幸次長, 辻 博史次長から, ご支援, ご指導を賜りましたことを厚く御礼申し上げます.

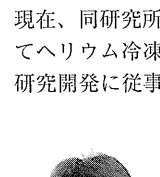
参考文献

- [1] ITER-FEAT Final Design Report, IAEA 2001.
- [2] プラズマ・核融合学会誌 Vol. 78 Suppl. (2002).
- [3] 安藤俊就, 檜山忠雄: 電気学会 B, 120, No.3, 449(2000).
- [4] 安藤俊就, 辻 博史: 低温工学 36, 309 (2001).
- [5] H. Tsuji *et al.*, Nucl. fusion 41, No.5, 645 (2001).
- [6] P. Bruzzone, *Proceeding of SOFT-21*, (Elsevier Science, Netherland, 2000) Vol.56-57, p.125.
- [7] 磯野高明, 西 正孝: 電気学会 B 119, No.11, 1263 (1999).
- [8] 超伝導・低温工学ハンドブック, 第Ⅱ編 3章(オーム社, 1993).
- [9] D. Faivre and B. Turck, IEEE Trans. Magn. 17, 1048 (1981).
- [10] R. Schermer and B. Truck, *Advances in Cryogenic Engineering* (Prenum Press New York, 1980) Vol.26, p.599.
- [11] M. Nishi *et al.*, Cryogenics 34, 505 (1994).
- [12] T. Kato *et al.*, *Advances in Cryogenic Engineering* (Pre-num Press New York, 1998) Vol. 43, 705.

- [13] M.O. Hoenig, *Proc. 5th Int. Conf. Magnet Technology*, (Laboratori, Nazionali, del CNEC, 1975) p.519.
- [14] K. Yoshida, M.F. Nishi and Y. Takahashi, IEEE Trans. Magn. 32, 2304 (1992).
- [15] Fusion Eng. Des. 7, 3 (1988).
- [16] H. Tsuji, E. Tada, K. Okuno, T. Ando *et al.*, *Proc. MT-11* (Elsevier Science Publishers, Essex, UK, 1990) p.806.
- [17] T. Ando, K. Okuno, H. Nakajima *et al.*, IEEE Trans. Magn. 27, No.2, 2060 (1991).
- [18] M. Nishi *et al.*, Cryogenics 33, No.6, 573 (1993).
- [19] N. Koizumi *et al.*, Cryogenics 34, 155 (1994).
- [20] N. Koizumi *et al.*, Cryogenics 37, 441 (1997).
- [21] 小泉徳潔, 高橋良和, 辻 博史, 加藤 崇他: 低温工学 35, 132 (2000).
- [22] N. Koizumi *et al.*, Cryogenics 36, 409 (1996).
- [23] N. Koizumi *et al.*, *Proc. MT-15* (Science Press, Beijing, China, 1998) p.453.
- [24] M. Steeves *et al.*, *Advances in Cryogenic Engineering* (Pre-num Press New York, 1991) Vol. 37, 345.
- [25] K. Matsui *et al.*, IEEE Trans. Magn. 32, 2304 (1996).
- [26] 小泉徳潔, 磯野高明, 松井邦浩, 布谷嘉彦, 安藤俊就: 低温工学 36, 368 (2001).



はま だ かず や
濱田 一 弥



こ い ず み の り き よ
小泉 徳 潔

1992年神戸商船大学大学院商船学研究所機関学専攻修了. 同年日本原子力研究所入所. 1998年4月から2年間科学技術庁(現文部科学省)原子力局核融合開発室勤務. 現在, 同研究所核融合工学部超伝導磁石研究室勤務. 主としてヘリウム冷凍システム, 超伝導コイル, 極低温構造材料の研究開発に従事. 低温工学協会および日本原子力学会会員.



1990年早稲田大学理工学部修士課程修了. 同年より, 日本原子力研究所に勤務, 核融合炉用超伝導磁石の研究・開発に従事. 主に, 超伝導導体の安定性の研究, ニオブ・アルミ超伝導導体の開発に注力. サッカーを趣味とし, 近年は, 体力の衰えに対抗して, マラソンを始める, フル・マラソン歴2回. 低温工学学会会員. 工学博士.