

連載講座 よくわかる核融合炉のしくみ

第9回 プラズマ閉じ込めの磁場を作る超伝導コイル

日本原子力研究開発機構 小泉 徳潔, 核融合科学研究所 西村 新



はじめに

今回の連載講座で取り上げる環状磁場閉じ込め核融合炉では、本連載講座の第2回¹⁾で記されているように、プラズマ閉じ込めのための磁場を作るトロイダル磁場(TF)コイル、プラズマ電流を誘起するための磁束変動を与えたり、プラズマの位置制御を目的とするポロイダル磁場(PF)コイル(中心ソレノイド(CS)コイルを含む)を使用します。TFコイルは定常運転をしますが、CSコイル、PFコイルは、その磁場を変動させる非定常運転を行います。また、TFコイルも、PFコイルが作る磁場の変動を受けます。大型核融合装置の超伝導コイル・システムの例として、ITERの超伝導コイル・システムを第1図に示します。

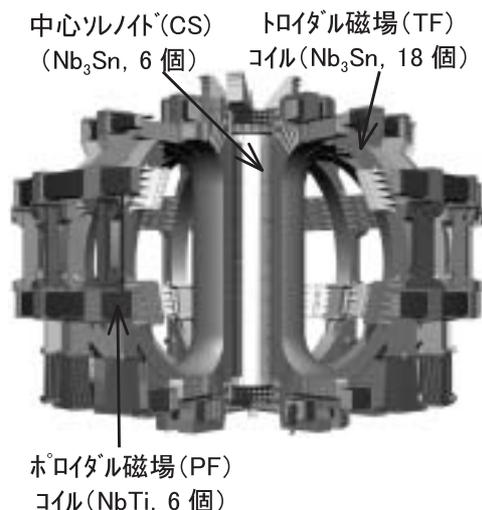
これらのコイルに超伝導導体が使用されることは、すでに本連載の初回²⁾で説明されていますが、本稿では、なぜ超伝導導体が必要とされるかをもう少し詳しく説明します。また、現在、特性の異なる複数の超伝導材料が開発されています。これらの特性についても紹介し、どのような超伝導材料が核融合炉に使用されるかを説明します。さらに、核融合用超伝導導体、コイルの構造について、その構造が採用された理由も含めて説明します。

なぜ超伝導コイルが必要ですか

電流が流れると、その電流を中心として同心円状に磁場が発生します。磁場の向きは、紙面に垂直に紙面の手前から向こうに向かって電流が流れる場

Intelligible Seminar on Fusion Reactors (9) Superconducting coil to generate magnetic field for plasma confinement: Norikiyo KOIZUMI, Arata NISHIMURA.

(2005年 6月24日 受理)

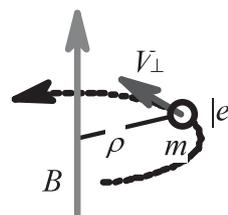


第1図 ITER 超伝導コイル・システム

合、時計方向となります。そして、磁場の強さは電流値に比例して大きくなります。今、まっすぐな銅線に大気中で1Aの電流を流すと、銅線から1m離れたところの磁場は $2 \times 10^{-7} T$ (1T=10,000 Gauss)となります。地磁気は $4 \times 10^{-5} T$ 程度ですから、地磁気の約200分の1ということになります。

プラズマは物質が正イオンと電子(荷電粒子といいますが)に電離した状態で、電離した正イオン、電子は磁力線の回りを回転しながら一定方向に移動します。磁力線の周りを、円軌道を描きながら荷電粒子が回転する運動をラーマー運動(第2図)といい、ラーマー半径 ρ は次式で表されます。

$$\rho = |e|V / mB \tag{1}$$



第2図 ラーマー運動

ここに、 $|e|$ は電荷、 V は磁力線に垂直な速度成分、 m は荷電粒子の質量、 B は磁場です。

磁場を強くすると、反比例の関係でラーマー半径は小さくなり、それだけイオンは磁力線に引き付けられ磁力線から離れにくくなります。これを「閉じ込めが良くなる」と表現します。核融合は、正イオンである原子核同士の衝突によって起こりますが、衝突させるためにはできるだけ長い時間、原子核を磁場中に捕まえておくことが必要なのです。

強い磁場を作り出すためには、コイルに大きな電流を流す必要があります。電流を流す物質を導体といいます。通常は導体として、銅線、銅チューブ、銅板が用いられます。銅は電気抵抗があるのでジュール発熱が起こります。純銅の室温での抵抗率は $1.7 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ ですので、断面積が ITER-TF コイル導体のそれと同等の $1.5 \times 10^{-3} m^2$ の銅チューブを考えると、1 m あたりの抵抗値は $1.2 \times 10^{-5} \Omega$ となります。もし、この銅チューブを ITER-TF コイルの導体と同等の 5 km を使って、定格電流値である 68 kA の電流を流すとすれば、277 MW の発熱が起こります。さらに、ITER では 18 個の TF コイルを使用しますので、都合 $277 \times 18 = 5$ GW の発熱が起こります。発熱を低減するためには、銅チューブの断面積を増やし、さらに、銅チューブが溶けないように冷却水を流さなければなりません。そのため、非常に大きな断面の磁石しか作れないこととなります。また、断面積を増やしたとしても、大変な電力を消費し(実際には 1 桁以上の合理化が期待できませんが³⁾)、発電を目的とする核融合炉にはふさわしくありません。

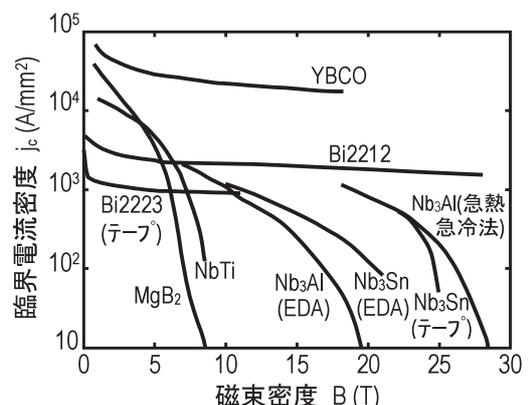
そこで、超伝導の出番です。超伝導状態とは電気抵抗がゼロの状態です。残念ながら無限に電流を流せるということではないのですが、超伝導材料だけを考えて 1 mm² あたり 1,000 A を越える電流を流すことができます。よって、電流密度の高い(断面積の小さい)、損失の極めて小さい超伝導コイルによって、プラズマ中を飛んでいる電離した正イオン、電子を捕まえる強い磁場を作り出すことができるのです。

どのような超伝導材料がありますか

1911年に H. K. Onnes によって水銀の電気抵抗がゼロになる(超伝導)ことが発見され、コイルへの応用が考えられました。しかし、超伝導材料には3つ

の制限があり、この制限の一つでも越えると超伝導でなくなることがわかりました。その制限とは、臨界温度(超伝導状態を示す最高温度)、臨界磁界(超伝導状態を示す上限の磁界)、および臨界電流密度(超伝導状態で流せる上限の電流密度)です。水銀の場合には臨界磁界が低く、当初期待された高い磁場を発生させることはできませんでした。その後、1950年代に合金の NbTi や金属間化合物である Nb₃Sn などで代表される高い臨界磁界を有する超伝導材料が発見され、1961年に 6 T の高磁場を発生する超伝導コイルが製作されました。その後もたゆまない開発研究活動が続けられ、1970年代には、大型の高磁場超伝導コイルが開発され、1998年にはすべてのコイルを超伝導化した大型ヘリカル装置(Large Helical Device(LHD)³⁾); ITER などのトカマク型装置では荷電分離を避けるためにプラズマ電流でらせん状の磁力線を作る¹⁾のに対して、コイルをらせん状に巻くことで、定常的な安定したらせん状の磁力線を実現した実験装置;後述)がプラズマ実験を開始しました。その後も、第3図³⁾に示すように、NbTi や Nb₃Sn の臨界電流密度は大幅に向上し、大型超伝導コイルへの応用が可能となっています。ITER では、TF コイル、CS コイルの定格運転磁場が約 13 T、約 12 T と高いため、これらのコイルには Nb₃Sn 導体を使用されます。運転磁場の低い PF コイルには、より安価で加工性に優れた NbTi 導体を使用されます。

1986年には銅酸化物超伝導材料が発見され、その後、90 K を超える高温で超伝導性を示す物質が次々と発見されました。Bi 2212、Bi 2223、YBCO などの高温超伝導酸化物は、NbTi や Nb₃Sn に比べて高い磁場で大きな臨界電流密度(第3図)を有していま



第3図 超伝導体の臨界電流密度

すが、機械的ひずみに対する感受性(もろさ)などの技術的課題もあり、核融合炉応用のためには更なる技術の発展を待たなければなりません。また、急熱急冷変態法という方法で製作した Nb₃Al 線も高い臨界磁界を示し、高温超伝導材料と共に、将来の核融合実証炉などへの応用が期待されています。

・核融合炉用超伝導導体はどのような構造になっていますか

核融合炉用超伝導導体は、多数の細い超伝導線を撚り合わせた構造を採用しています。本章では、始めに、超伝導導体を構成する超伝導線(素線)の構造を紹介し、その後、超伝導導体の構造について説明します。

1. 超伝導線の構造は

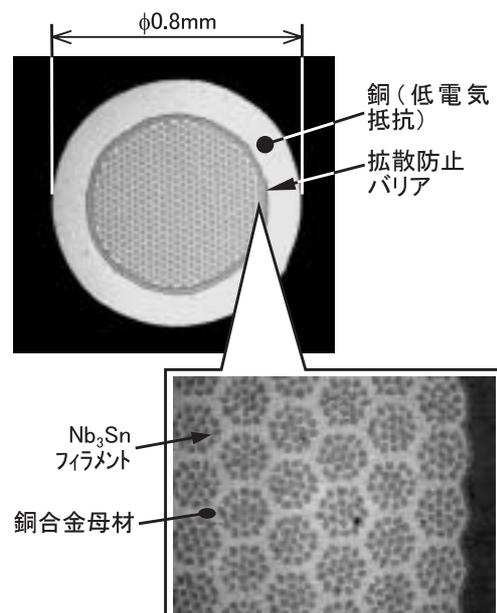
超伝導材料には内部への磁場の侵入を嫌う性質(反磁性)があります。鉄などの強磁性体の変動磁場を受けると、磁場の増加時と低下時でその磁化が異なる(ヒステリシスがある)ためにヒステリシス損失が発生します。反磁性体である超伝導体も、変動磁場を受けると、磁場の侵入を打消すように超伝導電流が流れますが、磁場の増加時と低下時でその流れ方が異なり、磁化(反磁性なので負の磁化)にヒステリシスが生じます。このため、鉄などの強磁性体と同様に、超伝導体も変動磁場を受けるとヒステリシス損失が発生します。ヒステリシス損失は、磁場の侵入を打ち消すように流れる超伝導電流に依存するため、臨界電流密度が高いほど、ヒステリシス損失は大きくなります。また、超伝導材料の直径が太いほど、磁化が大きくなってヒステリシス損失が増大します。ヒステリシス損失が大きい場合は、磁場変動を受けたときに、導体温度が超伝導状態が壊れ始める温度(分流開始温度)を超えて上昇し、常伝導転移が起こり、常伝導部が伝播して、超伝導状態に復帰できなくなります。超伝導の世界では、このようにジュール発熱によって超伝導導体の温度が上昇し、そして、常伝導部が伝播して、超伝導復帰できなくなる現象をクエンチと呼んでいます。コイルを安定に運転するためには、クエンチを避けなければならないことはいふまでもありません。

超伝導線を使用する立場からは、明らかに臨界電流密度が高い方が望ましく、通常は、超伝導材料を極細のフィラメントに加工する技術が採用されてい

ます。ちなみに、ITER-TF コイルで使用する Nb₃Sn 超伝導線に対しては、12 T、4.2 K における臨界電流密度が 700 A/mm²以上、± 3 T の変動磁場に対するヒステリシス損失が 1 J/cm³以下の性能が要求されており、超伝導フィラメントの直径は 5 μm 以下に設定されています。

また、超伝導コイルの運転時には、大きな電磁力のために素線が動き、隣接する素線との摩擦によって発熱するなどの熱擾乱が発生することがあります。NbTi や Nb₃Sn を用いた超伝導導体は通常、液体ヘリウム温度に近い 4.5 K 程度の温度で使用されます。このような極低温下では、金属の比熱が極めて小さいため、熱擾乱の絶対値が小さくても、それによる温度上昇は大きくなります。このために、素線の温度が、一時的に臨界温度を超えてしまうことがあります。超伝導材料は臨界温度以上では大きな電気抵抗を示すため、一度、超伝導が崩れてしまうと大きなジュール発熱が起こり、冷却能力が追いつかずクエンチに至ってしまいます。そこで、電気抵抗が小さく安価な銅を抱き合わせて、超伝導材料が常伝導転移した場合には、この銅に電流が流れるようにします。これにより、ジュール発熱を小さくして、クエンチを回避することができます。

核融合炉用超伝導線の断面構成の一例を第 4 図に示します。極細の超伝導フィラメントを銅あるいは銅合金の中に埋め込んだような構造が採用されています。さらに次節で説明するように、導体を構成す



第 4 図 Nb₃Sn 線断面図

る超伝導素線を撚り合わせるのと同様の理由によって、超伝導線に撚りを加えた構造を採用しています⁶⁾。

超伝導素線は、初め直径10 cm以上のピレットという大砲の弾のような状態から、縮径加工を繰り返して、最終的に、直径1 mm以下の線まで加工していきます。その加工度は数万にも及び、フィラメントが断線しないように伸線加工を行うためには、多くのノウハウが必要となります。日本の超伝導線メーカーは世界的にも優れた技術を有しており、このような縮径加工も上手に行うことができます。

2. 超伝導導体の構造は

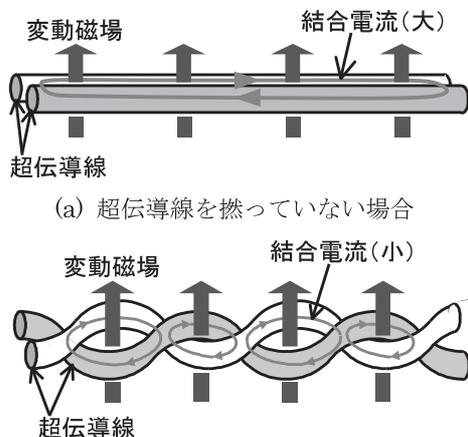
前述のように、銅の中に超伝導材料を配置するような構造を採用することによって、常伝導転移時の素線のジュール発熱を低減していますが、さらに高い冷却性能を得るために、多数の細い超伝導素線で導体を構成して、超伝導線が冷媒と接触する総表面積を大きくしています。この場合、最も簡単な導体構造は多数の超伝導線を単に束ねた構造です。しかし、単に束ねただけでは以下のような問題が生じます。

核融合炉用超伝導導体は、前述のように変動磁場を受けます。この場合に、例えば第5図(a)に示すような2本の超伝導線の対を考えます。核融合炉用超伝導導体の単長は数百メートルにも達するため、この超伝導線の対が作るループの面積は非常に大きくなります。したがって変動磁場を受けると、ループ内で大きな磁束変動が起こり、これを相殺するように循環電流(結合電流)が誘起されます。常伝導導体では電気抵抗のために結合電流は減衰しますが、

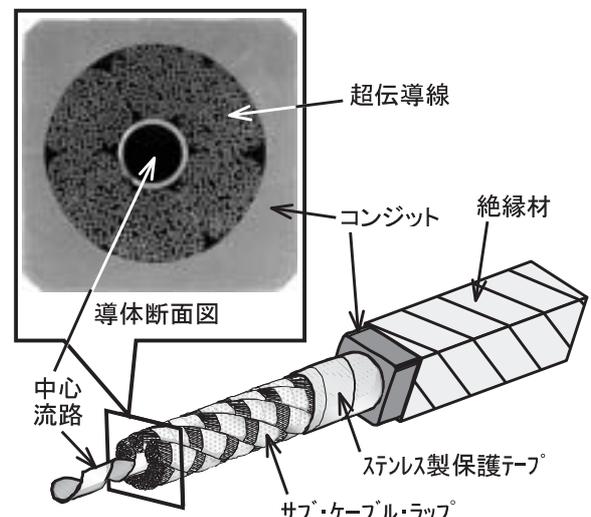
超伝導導体では電気抵抗がゼロのため、大きな結合電流が誘起されかつ長時間にわたって流れ続けることとなります。この大きな結合電流のために不安定現象が発生することがあります⁶⁾。そこで、超伝導導体では、超伝導線を単に束ねただけでなく、第5図(b)に示すように、撚ることによってループを貫く磁束を小さくし、大きな結合電流の発生を抑制しています。

しかし、それでも結合電流は誘起され、結合電流が素線間を渡るときに発熱が起こります。この発熱が大きいと、導体温度が上昇し、超伝導状態を維持できなくなってクエンチに至ってしまいます。このため素線間の電気抵抗を大きくして、結合電流を抑制する等の工夫がなされています。

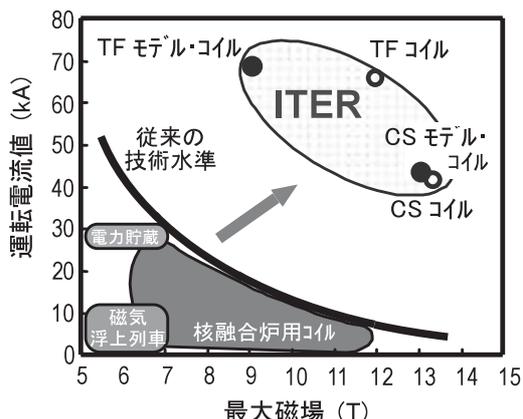
第6図に、ITER工学設計活動(EDA)のなかで、ITER-CSコイルの実現性を実証するために開発されたITER-CSモデル・コイル⁷⁾導体の模式図、断面写真を示します。超伝導線は電磁力支持用のコンジットという金属管で覆われ、コンジットの内部に4.5 Kの超臨界圧ヘリウムが流され、冷却されました。冷媒は、素線部分も流れますが、冷媒流路が素線部だけになると圧力損失が高くなるため、導体断面中心に圧力損失低減のための流路が設けられています。また、コイル巻線を行う際に、コンジット外周に絶縁材を巻き、隣接する導体、アースに対して、電気的絶縁がとられています。ITER-CSモデル・コイルの試験では、従来の技術からの飛躍的な向上が求められた超伝導性能(第7図)とともに、電気絶縁性能等の技術も実証されました⁷⁾。



第5図 変動磁場(外部より印加)と結合電流



第6図 CSモデル・コイル導体



第7図 ITER モデル・コイル開発成果

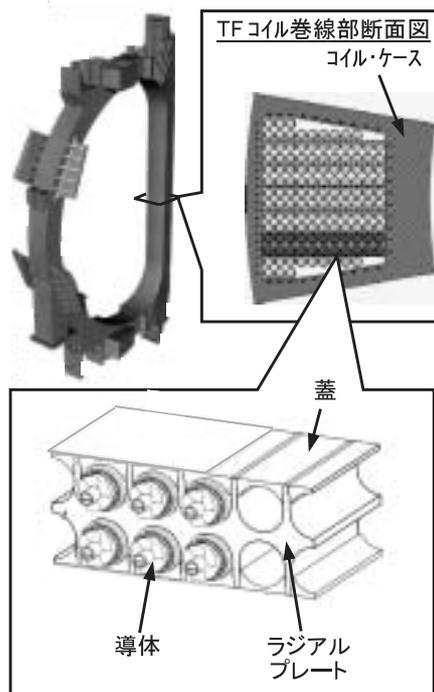
コイル構造はどうなっていますか 巨大な電磁力を支える構造は

磁場中にある導体に電流を流すと電磁力が発生します。電磁力は電流と磁場の外積として表されます。電流をアンペア(A), 磁場をテスラ(T), 電磁力を1mあたりの力(N/m)で表示すると, 1Tの磁場中にある銅線に1Aの電流が流れると, 1N/mの電磁力が生じることになります。

素線1本に100A流す場合を考えてみましょう。1Tの磁場中に素線が1本あり, その素線に100Aの電流を流すと, 素線の受ける電磁力は100N/mになります。1,000本束ねてあると電流の合計は100kAで電磁力の合計は100kN/mとなります。磁場が5T, 電流の合計(コイル電流×巻線ターン数)が10MAとすれば, 電磁力は50MN/mとなります。1mあたり5,000トンを超す電磁力です。このような大きな電磁力を支えなければ, 磁場中で超伝導線が大きく動いてしまい, 目的とする磁場を作り出すことはできません。

CSコイルやPFコイルは, 導体を蚊取り線香状, あるいはソレノイド状に円形に巻線したコイルです。このため導体に働く電磁力は, 主に半径方向の力であり, 導体が伸びようとします。ITERでは, コンジット自体でこの力を支持する構造が採用されています。

他方, ITER-TFコイルでは, 第8図に示すように, 超伝導導体をラジアル・プレートという溝を掘った板に埋め込んで, 蓋をして溶接する構造が採用されています。巨大な電磁力は, ラジアル・プレートを介して, コイルを支えている構造部材(コイル容器)に伝達されます。このような構造を採用する

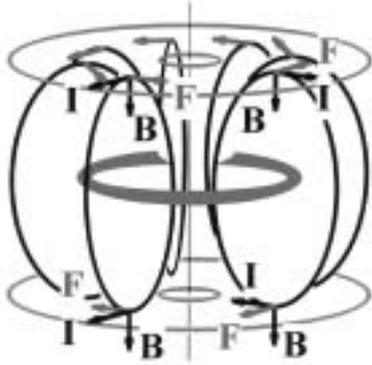


第8図 TFコイルの構造

ことで, コンジット外周に巻き付ける絶縁材に働く応力を小さくすることが可能となっています。当然のことながら, コイル容器には巨大な電磁力がかかるため, 高強度, 高靱性の構造材が必要となります。

核融合炉用超伝導コイルは, 通常, 約4Kに冷却されていますので, 電磁力支持構造も同じ温度に冷却されます。一般に構造材料は, 温度の低下とともにもろくなります。巨大な電磁力を支える材料がガラスのように破壊しては大変です。多くの場合, 4Kでも靱性の優れた, 高強度(ITERでは, 0.2%耐力が1,000MPa以上の高強度材も使用されます)のオーステナイト系ステンレス鋼が用いられています。ITER-TFコイルの実現性を実証するために開発されたITER-TFモデル・コイルは, これらの高強度, 高靱性の構造材を用いて製作され, 巨大な電磁力下でも機械的に安定して運転できることが実証されました(第7図)。

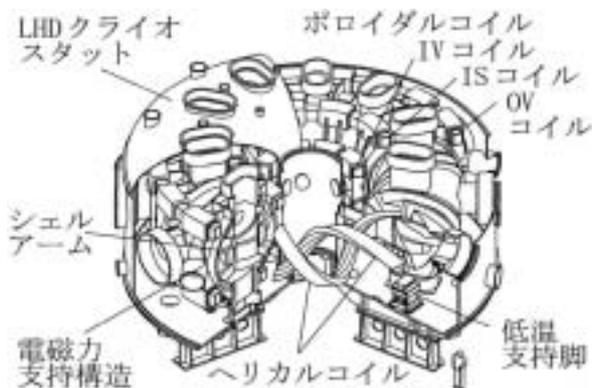
環状磁場閉じ込め核融合炉の場合, 磁場と電流の流れる方向との関係で, 装置の赤道面から上と下では超伝導磁石に加わる電磁力の方向は逆になります。TFコイルの赤道面から上の部分に反時計方向に電磁力が働く時には, 赤道面から下では時計方向に電磁力が働きます。ちょうどソフトボールの上下に手をあて, ボールをねじるような向きの力が作用することになります(第9図)。



第9図 TF コイルに働く転倒力

このような変形を抑えるには、隣り合う TF コイル同士を連結しなければなりません。単純に梁で連結すると連結梁に大きな曲げ応力が発生します。これは隣り合う磁石同士が将棋倒しのよう上下方向にずれながら変形(せん断変形)するため、それを抑える一つの方法は、すべての TF コイルを包み込むように薄い板で覆ってしまう方法です。住宅建設でいえば枠組壁構造で、壁がせん断変形を抑え、応力の集中を妨げています。ITER の場合、内周側ではすべての TF コイル容器の面を接触させ、主に摩擦力によってコイルが連結されています。外周側では、加熱装置等で使用するポートの都合上全面を覆うことができないため、4枚のプレートを使用して連結されています(第1,8図)。

現在、核融合科学研究所でプラズマ実験が進められている LHD では、プラズマ閉じ込めのためにヘリカルコイルが採用されています(第10図)⁷⁾。このコイルでは、液体ヘリウム中に導体を浸して冷却する浸漬冷却方式が採用されており、15本の超伝導線をシースと呼ぶ銅合金の中に配置した超伝導導体を作り、その導体をコイル容器に巻いています。その



第10図 LHD のヘリカルコイルと支持構造

とき、導体と導体の間に電気絶縁材を挟み込み、その絶縁材を介して電磁力が隣りに伝わるようにします。これにより、それぞれの導体に発生した電磁力は、最終的には導体を収めているコイル容器に伝わり、電磁力を支持する構造となっています。

．おわりに

核融合炉の中で、大型超伝導コイルは、強力な磁場を発生しプラズマを閉じ込めるための必要不可欠な装置です。本講座では、できるだけわかりやすく解説するために、その原理や基礎に重点を置いてまとめました。LHD や ITER のような実際の設計や製作ではいろいろなノウハウがあり、それらの一端は引用文献⁴⁾⁷⁾などに解説されています。参考にしていただければ幸いです。

国際協力でその建設が始められる ITER では、これまで研究開発されてきた最新の研究成果や技術も取り入れられ、人類史上最大の超伝導コイルの設計が進められています。合理化できるところはさらに合理化し、優れた技術の集約を図り、安全な優れた超伝導コイル・システムが構築されることが期待されています。

参考文献

- 1) 鎌田 裕, “連載講座 よくわかる核融合炉のしくみ; 第2回 核融合炉設計のためのプラズマの性質 トカマク炉心プラズマに必要な総合性能”, 日本原子力学会誌, 47, 45(2005).
- 2) 上田良夫, 他, “連載講座 よくわかる核融合炉のしくみ; 第1回 核融合炉の概要 そもそも核融合炉とは”, 日本原子力学会誌, 46, 845(2004).
- 3) 高畑一弥, “講座 核融合と超伝導工学; 1. 核融合用超伝導コイル”, プラズマ・核融合学会誌, 81, 273(2005).
- 4) 特集 大型ヘリカル装置(LHD)計画, プラズマ・核融合学会誌, 74, Supplement (1998).
- 5) K. Okuno, *et al.*, “Superconducting magnet system in a fusion reactor”, *J. Nucl. Mater.*, 329-333, 141(2004).
- 6) 濱田一弥, 他, “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”, プラズマ・核融合学会誌, 78, 616(2002).
- 7) 安藤俊就, 他, “中心ソレノイド(CS)モデル・コイル計画”, 低温工学, 36, 309(2001).
- 8) 特集 ITER 工学設計, プラズマ・核融合学会誌, 78, Supplement (2002).

著者紹介

小泉徳潔(こいずみ・のりきよ)



日本原子力研究所で核融合炉用超伝導体の研究開発に従事。現在、日本原子力研究開発機構超伝導磁石研究グループ副主任研究員。工学博士。

西村 新(にしむら・あらた)



核融合科学研究所炉工学研究センター教授。核融合用大型超伝導マグネットシステムのための中性子照射損傷、低放射化超伝導材料、超伝導体の強磁場中での特性評価、低放射化構造材料の特性評価研究などに従事。

From Editors 編集委員会からのお知らせ

— ホームページ更新情報 —

<http://wwwsoc.nii.ac.jp/aesj/> (10/10 現在)

- 論文誌バックナンバーの電子化を進めています。J-STAGE 未搭載分も順次アップ予定です。
- 電子投稿についてのお問合せは、事務局電子投稿担当 e-submit@aesj.or.jp まで。
- 投稿された論文の査読状況は下記にてご確認下さい。
<http://wwwsoc.nii.ac.jp/aesj/publication/ronbunshi.htm>



— 最近の編集委員会の話題より —
(2005年9月30日第4回幹事会)

- 和文論文誌への招待論文、レビュー、原子力研究開発機関の詳細な技術報告等の投稿勧誘を検討することとした。
- 英文論文誌特集号の進捗状況を確認。
- 英文論文誌科研費補助金申請について報告と各委員へのお願いがあった。
- Advisory Editor の採用等、英文論文誌の国際化に関して検討することとした。
- 英文論文誌が科学技術振興機構の電子アーカイブ対象誌に選定されたことを報告。

- 英文論文誌掲載論文の体裁について議論があり、今後見直しをすることとした。
- 編集委員会からの学会賞候補推薦について報告。
- 学会新理事に観覧車欄への寄稿を依頼した旨報告。
- 学会誌記事収集機能の強化案の説明があり、企画記事、「秋の大会」発表からの記事候補について検討。
- 理事会直結の各委員会・支部の活動報告の場として、「学会 NEWS —ホットな話題」欄を新設することとした。
- 学会誌記事の新編集方針について議論。学会誌記事を読みやすくするための「記事執筆の目安」の提案があり、その趣旨・会員周知の方法等に関して各委員からコメントがあった。これをもとに再検討したものを学会誌に掲載することとした(本号掲載)。
- 学会誌の目次、本文レイアウト等について議論。今後見直しを進めることとした。
- 学会誌の広告収入について議論。学会財務体質強化のための編集委員会方針を策定し、総務財務委員会に報告することとした。
- 各編集担当グループから活動報告があり、学会誌記事評価の紹介があった。現在、Web を利用したアンケートシステムも構築中である。

編集委員会連絡先 hensyu@aesj.or.jp