

# トポロジー最適化によるヘリカル型核融合炉のコイル支持構造設計

田村 仁

核融合炉の実現には、プラズマを閉じ込める強力な磁場を発生する超伝導コイルが必須です。超伝導コイルは超伝導導体を数百周巻き、大電流を流すことで磁場を発生させます。電流が流れているコイルに磁場が作用すると電磁力という力が発生します。この電磁力は非常に大きいため、超伝導コイル自身ではこの力に耐えられず、コイルが大きく動いたり変形したりしてしまいます。これを防ぐには、コイルの周りを強い材料でできた構造物でがっしりと取り囲み、コイルが大きく動かないように支える必要があります。この構造物を支持構造物と呼びます（図1）。

核融合炉では強力な磁場を広い空間で発生させる必要があります。コイルが蓄えているエネルギーが大きいくほど、より強い磁場を広い空間に発生していることとなりますが、発電の実証を目指した核融合炉では150ギガジュールという強力なコイルのエネルギーが必要とされています（地球上で千トンの物体を100メートル持ち上げるエネルギーが約1ギガジュール）。コイルのエネルギーが大きくなると発生する電磁力も同時に大きくなり、発電の実証を目指した核融合炉の超伝導コイルにはたらく電磁力は、1メートル当たり1万トン以上の重量を受けることに相当する巨大な力となります。

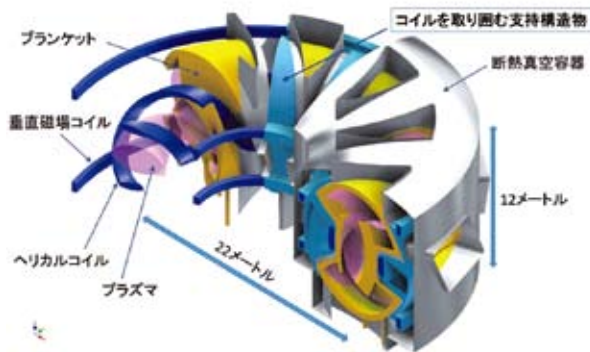


図1 発電実証ヘリカル型核融合炉の概略図。超伝導コイルは、2本のらせん状のヘリカルコイルと4本の円型の垂直磁場コイルで構成されます。超伝導コイルに働く強大な電磁力でコイルが動いたり変形したりしないように、高い強度をもつステンレス鋼で作られた支持構造物で強固に支えられています。

このため支持構造物もより強固なものが必要となり、核融合炉における支持構造物の総重量は莫大なものとなります。コイルのエネルギーと支持構造物の重量の関係をグラフにしたのが図2になります。発電の実証を目指した核融合炉では、支持構造物の重量が大型ヘリカル装置（LHD）の20倍、国際熱核融合実験炉（ITER）の1.6倍以上の約8千トンになると予想されていました。これをなんとか軽量化できないかと考え、「トポロジー最適化」という手法を適用することを試みました。

ここで、「トポロジー最適化」について簡単に説明します。まず、「トポロジー」とは、ものの形を分類するもので、取っ手の付いたコップとドーナツの例が有名です。取っ手の付いたコップを粘土のように伸ばしたり縮めたりしていくと、ドーナツと同じ形に変えることができます。このような場合をトポロジーの変化がないと言います。このときコップの底に穴が開いていると、いくら伸び縮みさせても穴が2つある8の字形状にしかならず、普通のドーナツ形状にすることはできません。この場合をトポロジーが変化していると言います。これまでの設計では、長さや厚みを変化させて（トポロジーの変化がない）最適な形状を探

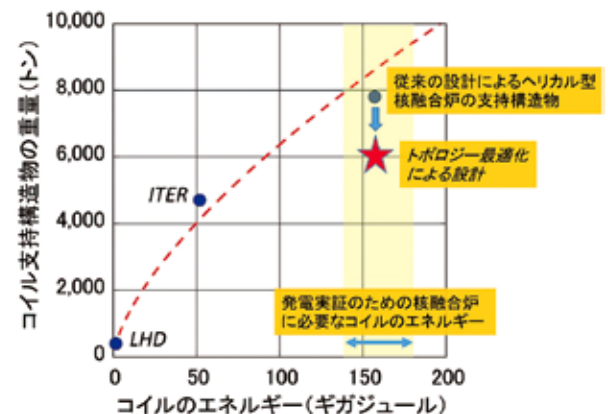


図2 コイルのエネルギーと超伝導コイルを取り囲む支持構造物重量の関係。支持構造物の重量はコイルのエネルギーが大きいくほど重くなりますが、より強い材料を使用するために直線的な増加にはならないと予想されます。

していました。トポロジー最適化では、これらの変化にトポロジーの変化（＝新たに穴をあけること）を追加して、最適な形状を探します（図3）。もちろん勝手に穴をあけるわけではありません。強度に影響がなさそうな部分を探し、そこを取り去っても全体の強度に大きな変化がないかを計算で確かめる、これを繰り返すことによって最終的に除去できる部分を決めていきます。この手法は、従来の経験や実績からは想像できないような画期的な形状を生み出す可能性があるもので、自動車部品の軽量化やコスト削減に非常に有効であることから近年急速に発展しています。このトポロジー最適化手法を、巨大で複雑な構造を持つヘリカル型核融合炉の設計に適用した例はこれまでありませんでした。

構造物の強度を決めるのが、その内部に働く力（応力）です。構造物に発生する応力が使用材料によって決まっている許容値よりも大きくなると構造物が壊れてしまうので、設計ではそれが起こらないような応力分布とする必要があります。これまでの核融合炉の設計では、支持構造物の大まかな3次元モデルを設計者の経験を基に作成し、構造物の応力分布を計算した結果を参照して、基本的な厚さ、詳細部分の長さ及び表面形状などを修正する作業を繰り返して最適形状を探っていました。トポロジー最適化手法の適用により、これまでの設計で得られた形状から更に最低限必要な領域のみを残した形状を得ることができました。この最適化の結果、従来の設計に比べてかなり隙間が空いた形状でも強度を維持した設計が得られ、結果としてコイル支持構造物の総重量を約25%低減することができました（図2、図4）。また、得

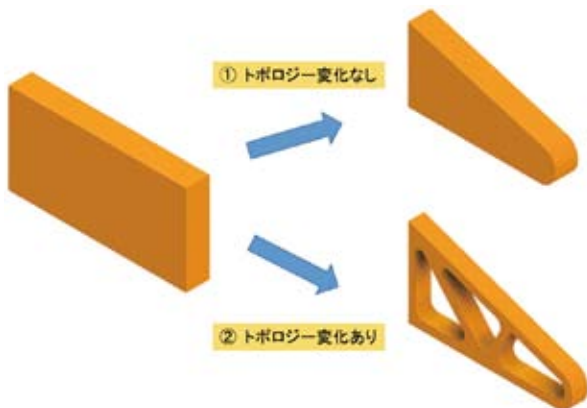


図3 構造物の設計方法。①トポロジーの変化がない状態で外周の寸法や形を変化させる方法。②トポロジーの変化を許容し強度に影響を与えない部分を取り去る方法。②はで強度を維持したまま大幅な減量が期待できます。

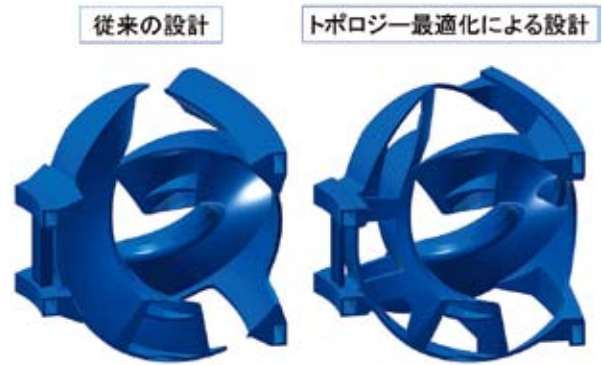


図4 トポロジー最適化を適用して得られたコイル支持構造物の形状（右図）。左図は従来の設計手法によるもので、これらの形状を円周方向に10個並べるとドーナツのような全体形状になります。これまでの設計では全体で7,800トンだった重量が、トポロジー最適化によって約2,000トン低減できました。

られた最適化形状に電磁力が作用した時にどのような応力が作用しているかを知ることは、巨大な構造物をどのように分割して製造し、どうやって組み立てるかといった詳細設計をしていく上で大変重要な情報となります。図5は応力分布を詳細に計算した結果で、トポロジー最適化によってたくさんの隙間ができていても強度に問題がない構造となっていることが確認されました。

核融合炉の大幅な減量は、建設時の材料コストの低減や、コイルを超伝導状態にするために極低温に冷やさなければならない部分の重量の低減、さらには運転終了後の材料処理の観点からも有益です。今後、トポロジー最適化手法を用いた核融合炉設計研究が更に進展し、核融合炉の発電実証に大きく近づくこと期待されます。

（核融合システム研究系 准教授）

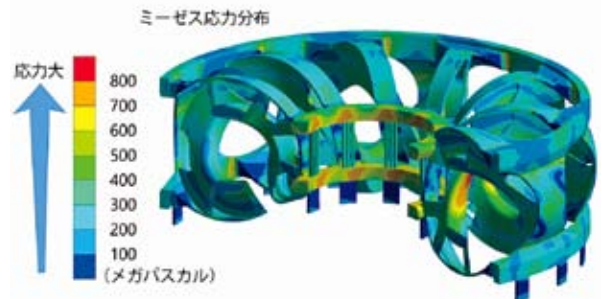


図5 トポロジー最適化後の支持構造物のミーゼス応力分布。ミーゼス応力は強度評価に用いられる数値指標で、この値が材料によって決まっている許容応力以下であれば構造物は問題なく力を支えることができます。計算の結果、ヘリカルコイルの底面、内側の垂直磁場コイル部分などに高い応力が発生していますが、ITER計画で開発された高強度ステンレス鋼などの使用により、許容範囲内となることが確かめられました。