

核融合発電所の姿を想像する～核融合炉システム設計～

後藤 拓也

核融合科学研究所では、大型ヘリカル装置(LHD)の建設及び運転の経験とプラズマ閉じ込め実験の成果に基づいて、将来の核融合発電を目指したヘリカル核融合炉FFHR-d1の概念設計とそのために必要な工学要素技術の研究開発を進めています。今回は、そのヘリカル核融合炉、そしてそれを含む核融合発電所の全体像を決めるためのシステム設計研究を紹介します。

一般に“設計”と聞くと、仕様書や設計図を作る作業を思い浮かべる方が多いと思いますが、実際にもものを作るまでには、“こういった機能を実現したい”、という要求(ニーズ)に対して必要となる仕様(スペック)を明らかにし、それを実現するシステムの全体構造(概念)を決める、というプロセスが必要です。特に核融合炉は、プラズマに直接面して熱の取り出しや燃料の自己生産等を行うブランケットと呼ばれる機器、プラズマの中の不純物を取り除く排気ポンプ、プラズマを閉じ込める磁力線のかごを作る超伝導コイル、プラズマ中に燃料を供給する装置、プラズマを加熱する装置、プラズマの状態を計測する装置等、たくさんの複雑な装置の集合体です。これらは限られたスペースを取り合うように設置され、また一つの機器の性能が別の機器の性能に影響するため、それぞれを独立に設計することはできません。さらに、核融合発電所全体を見ると、超伝導コイルを冷やすための液体ヘリウムを作る設備、取り出した熱を使って

発電する設備、燃料を精製する設備、メンテナンスをする設備等、核融合炉本体以外にも多くの設備があります。このため、単に核融合炉本体を構成する各機器を互いに矛盾なく設計すれば良いというだけではなく、核融合発電所全体をできるだけ安く、短い期間で作ることや、安全性や信頼性を高めることも考える必要があります。このためには核融合発電所全体を一つの大きなシステムとして見て、各機器の間のバランスをうまく取りながら設計の全体像を描く必要があります。それを行うのがシステム設計の役割です。

システム設計の一番重要な仕事は、核融合炉の大きさやプラズマを閉じ込める磁場の強さ、出力などの基本仕様を決めることです。もちろんこれらの仕様は最終的にはそれぞれの機器の詳細な設計の結果を受けて決まるものですが、そのためには実際にもものを試作したり、大規模な計算機シミュレーションを行う必要があります。大型で複雑なシステムから成る核融合炉では、そういった作業にも時間や費用がかかりますので、機器同士のバランスを調整するためだけに何度も試行錯誤する訳にはいきません。また、そもそも機器の設計をするためには、設置するスペースや、機器が受ける力や熱の大きさ等といった条件のおおまかな設定が必要で、そのためには基本仕様にある程度当たりを付けておく必要があります。このために、各機器やプラズマなど核融合発電所を構成する要素

全てを、できるだけ簡単なモデルで表現したシステムコードと呼ばれる計算プログラムが使われます。システムコードは簡単なモデルを使うことで計算が速く済み、要素同士の関係やそれぞれの要素が核融合炉の性能にどのように影響するかについて、条件をどんどん変えながら調べることができます。しかし、ヘリカ

ル核融合炉は3次元的で複雑な形状をしているため、シンプルなモデルだけでその性質を全て再現するのは容易ではありません。そこで、LHDの実験成果や計算機シミュレーションの結果を活用して、様々なプラズマやコイルの形状に対するデータベースを作ることで、高速な計算と正確な性能予測を両立できる専用のシステムコードを開発しました。開発したシステムコードのイメージを図1に示します。

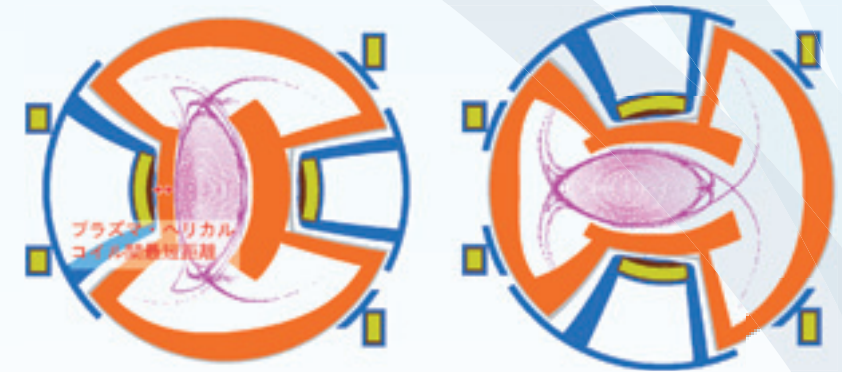


図2 プラズマ、ヘリカルコイルとブランケットの位置関係。ヘリカルコイルとプラズマの間の距離は場所によって変わり、プラズマが縦長の形になる位置での内側で一番小さくなる。

このシステムコードを用いてヘリカル核融合炉FFHR-d1の基本仕様を決める設計パラメータの探索を行いました。設計の成立性を考える上では、特に超伝導システムの規模やコイルが受ける力の指標となる蓄積磁気エネルギー、プラズマに面した機器の寿命に影響する平均中性子壁負荷、ブランケットの設置スペースに対応するプラズマとヘリカルコイルの間の最短距離(図2)が重要な条件となります。過去の設計研究での検討の結果、平均中性子壁負荷を1平方メートルあたり1,500キロワット以下に抑えられれば30年間の運転中のブランケットの交換を数回以下に抑えられること、また蓄積磁気エネルギーを160ギガジュール(ギガは10億)程度以下に抑えられれば、既存の技術水準を基にした研究開発の最適化によって製作を見通せることが分かっています。一方、コイルとプラズマの間の距離は、ブランケットの設計に余裕を持たせるためにも大きいことが望まれます。システムコードによって、装置の大きさとプラズマを閉じ込める磁場の強さをいろいろと変えた場合に、これらの条件がどうなるかを知ることができます。図3はそれを示したもので、赤色に塗った部分は平均中性子壁負荷が1,500キロワットを超える領域、青色に塗った部分は蓄積磁気エネルギーが160ギガジュールを超える領域です。そこで、FFHR-d1の設計候補点として、残った領域(図の白い部分)で最もブランケットスペースが大きくなる、装置サイズ15.6メートル、磁場の強さ4.7テスラ(1テスラは地磁気の約2万倍)の点(図に星印で示した点)を選択しました。

では、スペックを決めたらシステム設計の仕事は完了かという、次はそれぞれの機器の具体的な形を考えて、お互いにぶつかったりしていないか、

またどうやって設置したりメンテナンスをするかについて、考える必要があります。ヘリカル核融合炉はプラズマだけでなく、プラズマに面した機器やそれらを支える構造物も3次元にねじれた構造をしています。これらの形を数式を用いて表現することで、装置の全ての位置で途切れない滑らかな形を実現することができました。図1に示したヘリカル核融合炉FFHR-d1の3次元構造図はこの数式表現に基づき作成したものです。また、形だけでなく、各機器をどうやって動かして実際に核融合炉を運転するかということも、システム全体を見て考える必要があります。今後はそういった検討をそれぞれの機器の詳細な設計と並行しながら進めて、そこで分かってきたことを再び機器の設計に反映させる作業を進めていきます。

(核融合システム研究系 助教)

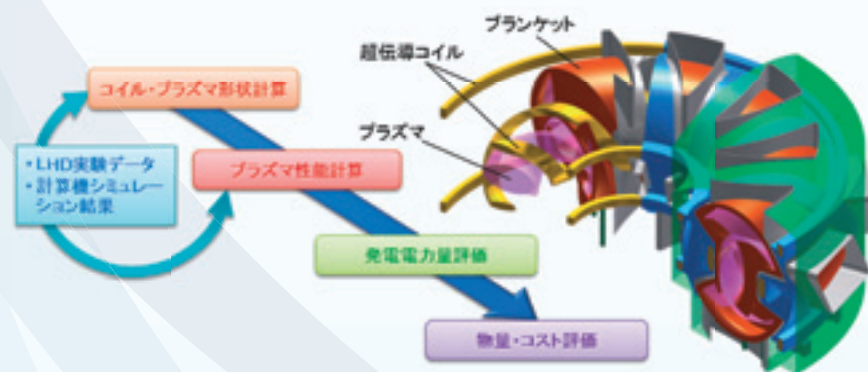


図1 システムコードのイメージとヘリカル核融合炉FFHR-d1の3次元構造図。

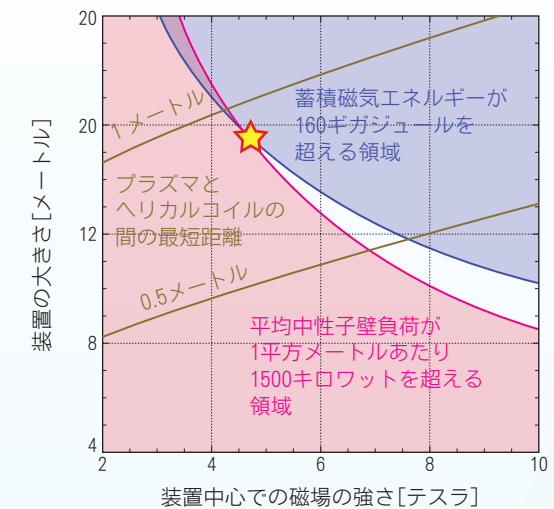


図3 ヘリカル核融合炉FFHR-d1の設計点探索結果。星印はFFHR-d1の設計候補点。