

# 核融合科学研究所と中国西南交通大学の共同プロジェクトによる準軸対称ヘリカル型実験装置CFQSの建設

清水 昭博

核融合科学研究所は、世界各国の大学や研究機関と学術交流協定を結び、数多くの国際共同研究を進めています。2017年7月には、中国西南交通大学と国際学術交流協定を締結し、世界初の準軸対称ヘリカル型実験装置となるCFQSの設計研究を開始しました。現在、装置建設及び共同実験開始に向けて、物理・工学両面から様々な検討を進めています。今回は、この日中共同プロジェクトの進展について紹介します。

核融合発電を実現するためには、高温・高密度のプラズマを閉じ込めて、長時間維持することが必要です。プラズマは電気を帯びた荷電粒子であるイオンと電子から構成されており、それらの粒子は、磁力線に巻き付く性質があります。しかし、まっすぐな磁力線では端からプラズマが逃げてしまいます。このため、磁力線の端と端をつなげて、ドーナツ型の磁力線のカゴを作ることによって、カゴの中にプラズマを閉じ込めます。単純なドーナツ型では、湾曲した磁力線やプラズマ中にできた電場により、粒子が磁力線のカゴの外へと逃げてしまい、プラズマを長時間閉じ込めることができません。そこで、磁力線にひねりを与えて、らせん状（ヘリカル状）の構造を作り出すことで、粒子を逃げてにくくしてプラズマを閉じ込めます。

プラズマをドーナツ型に磁場で閉じ込める装置は、ひねりの与え方によって、トカマク型とヘリカル型の2種類に大別されます。トカマク型は、プラズマは単純なドーナツ型をしており、ドーナツの中心を軸に回転しても形が変わりません。これを「軸対称性がある」と言います。このプラズマの中に大きな電流を流すことでひねりを与え、らせん状の磁力線構造を作ります。これに対し、ヘリカル型は、磁力線を発生させるコイルそのものをひねることで、磁力線をらせん状にしています。そのため、ヘリカル型は、プラズマ中に電流を流す必要がなく、プラズマは磁力線のカゴに沿ってねじれたドーナツ型（軸対称性がない）になります。プラズマ中に電流を流し続けるのは大変難しいため、これを必要としないヘリカル型は、プラズマの長時間維持に優れた装置とすることができます。一方で、ヘリカル型はトカマク型と比べて軸対称性がないことから、理論的には、プラズマの粒子が磁力線のカゴの外に逃げやすいとさ

れてきました。

そこで、ヘリカル型装置の長時間維持に優れるという利点を保持しつつ、粒子が逃げにくい装置の設計・実験研究が行われてきました。核融合科学研究所の大型ヘリカル装置（LHD）の実験結果は、コイルに流す電流を制御し、粒子が逃げにくくなるように磁力線のカゴを調整すると、温度が高くなる傾向にあります。LHDでは、重水素ガスを用いてプラズマを生成する実験（重水素実験）で、ヘリカル型の実験装置において世界で初めて核融合条件である1億2,000万度に達する高イオン温度プラズマを生成することに成功しました。これはプラズマの重水素化と磁力線のカゴ調整の相乗効果によるものです。

ヘリカル型では、コイル形状を自由に選ぶことができるので、それを工夫することにより、粒子をより逃げてにくくし、プラズマの閉じ込めを更に高度化できる可能性があります。このようなヘリカル型の一つとして、先進的な「準軸対称ヘリカル型実験装置」が考え出されました。この装置では、磁力線のカゴが、見た目は軸対称性はありませんが、粒子から眺めると軸対称性が存在します。また、磁力線のカゴを生成するためにプラズマに電流を常時流す必要はありませんので、プラズマの長時間維持ができるというヘリカル型と、軸対称性により粒子が逃げにくいというトカマク型の両方の長所を併せ持つ装置となります。この準軸対称ヘリカル型実験装置については、これまで日米独を軸に、理論的な研究が主として展開されてきましたが、残念ながら実際の実験装置の実現には至りませんでした。

核融合科学研究所では、世界初の準軸対称ヘリカル型実験装置となるCFQSの建設・実験開始に向けて、中国・西南交通大学との日中共同プロジェクトを推進しています。中国の豊富な人的資源と資金を活用して、ヘリカルプラズマ研究において豊富な経験と実績を持つ核融合科学研究所の主導の下、CFQSを西南交通大学のキャンパスに建設します。中国におけるヘリカル型の研究は緒に就いたばかりであり、CFQSは、中国初のヘリカル型実験装置でもあります。CFQSの設計においては、閉じ込めに適した磁力線のカゴとプラズマの形状をはじめに決定します。これには膨大な計

算が必要であり、核融合科学研究所のプラズマシミュレータ（スーパーコンピュータ）を利用しました。そして、プラズマの形状と磁力線のカゴを決定した後、それを実現する磁場コイルを設計しました。ここでは、以前に筆者を含む研究グループが行ってきた準軸対称ヘリカル型装置CHS-qaの設計研究で得られた数多くの研究成果が取り入れられています。図1にCFQSのプラズマの形状を示します。色は磁場の強さを示しており、ドーナツ周回方向には磁場の強さが変わらない軸対称性を示しています（この磁場の特徴はトカマク型と同じです）。プラズマ形状は軸対称ではないことから、この性質を準軸対称と呼んでいます。図2に、CFQSの磁場コイルと真空容器の概略図を示します。大半径（ドーナツの中心からプラズマの中心までの距離）は1メートル、磁場の強さは1テスラになります。磁場コイルには大きな電磁力がかかるため、プラズマを加熱するための機器や、密度や温度を測るための計測機器のスペースを十分確保しつつ、大きな電磁力を支えるための支持構造を設計しています。

2017年の国際学术交流協定締結以降、毎年、西南交通大学にて運営会議を開催し、核融合科学研究所の所長、西南交通大学の学長あるいは副学長の他、本プロジェクトの主要メンバーによる議論により、プロジェクトの重要事項及び方針を決定しています。2019年5月に開催された第2回運営会議では、磁力線を発生させるコイルの試験体を合肥Keye社において製作することを決定しました。研究者及び技術職員で構成される核融合科学研究所の共同プロジェクトメンバーは、年に幾度も成都市の西南交通大学、及び合肥市の装置メーカーであるKeye社を往訪し、また時にはテレビ会議システムを活用し、緊密に意見交換しつつプロ

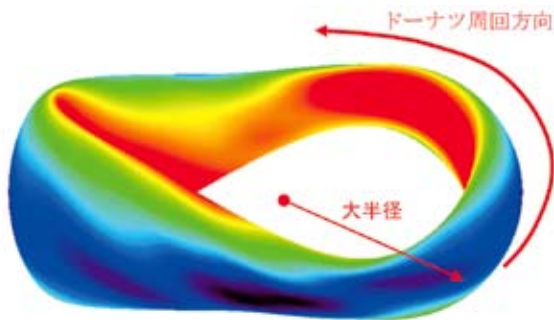


図1 スーパーコンピュータによる計算により得られた準軸対称ヘリカル型実験装置CFQSのプラズマ形状。色は磁場の強さを表しており、赤の場所で磁場が強く、黄、緑、青の順に磁場が弱いことを示しています。これまでのヘリカル型はコイルに近い場所で磁場が強くなっていましたが、CFQSでは、コイルの場所に関わらず、プラズマの内側で磁場が強く、外側で弱くなっていて、ドーナツ周回方向には磁場は変化しません。装置規模は、磁場強度が1テスラ、大半径（ドーナツの中心からプラズマの中心までの距離）が1メートルです。

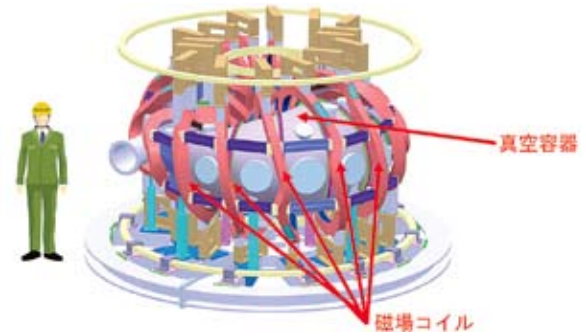


図2 CFQSの磁場コイルとプラズマを閉じ込める真空容器（淡いピンク色で示した部分）の概略図。真空容器を囲むように設置されたモジュラーコイルと呼ばれる磁場コイルがとても複雑な形をしていることが、この装置の特徴です。

ジェクトを進めています。

現在までに、コイルの試験体の製作が完了しました。図3に完成したコイルの試験体の写真を示します。この試験体の製作により、複雑な形状の磁場コイル（モジュラーコイルと言います。）を十分な精度で製作できる見通しをつけることができました。また、この試験体を用いて様々なテストを実施し、実際に電流を流して運転した時の銅導体及び冷却水の温度上昇や、モジュラーコイルの耐電圧性能を確認しています。試験体の製作、テスト結果を参考にして、実機のモジュラーコイルの製作に着手します。真空容器についても、間もなく試験体の製作に着手する予定です。

CFQSの完成後は、先進的な準軸対称ヘリカルプラズマの原理検証実験を開始します。核融合科学研究所の主導の下、核融合科学研究所と西南交通大学の研究者や学生のみならず、ヘリカルプラズマ研究を行う日本国内の大学、欧米の研究者等も参画する形で先進的なヘリカルプラズマ研究を展開する予定です。この共同プロジェクトには核融合科学研究所の進めてきたこれまでの研究成果が大きく活かされながら、世界中からヘリカル研究の更なる進展が期待されています。

（高温プラズマ物理研究系 助教）

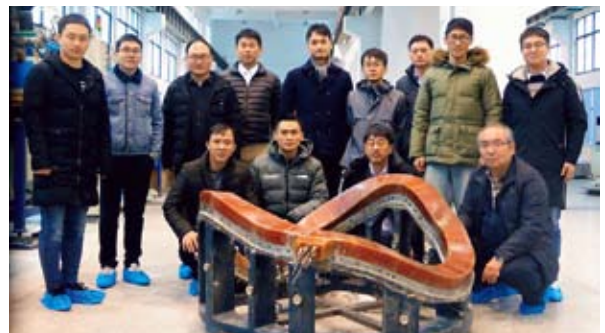


図3 磁場コイル試験体の完成写真。2020年1月に合肥Keye社の工場を視察しました。後ろに写っているのは、核融合科学研究所、西南交通大学の視察メンバー及び合肥Keye社の製作担当者です。CFQSの磁場コイルの中で、最も複雑な形状のものを試験的に製作しました。筆者は、前列右から二人目。