

# NIFS NEWS

ISSN 1884-1600



No.253



図書館棟

2020 APR/MAY

>>> 研究最前線・・・2-5

- 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

>>> 特集・・・6-7

- 核融合科学研究所図書室  
太田雅子

>>> トピックス・・・7-8

- 2019年度吉川允二記念核融合エネルギー奨励賞を受賞  
第14回日本物理学会若手奨励賞を受賞  
令和2年度科学技術分野の文部科学大臣表彰若手科学者賞を受賞  
2019年度の研究成果をプレスリリース  
2020年度総研大新入生の紹介  
2020年度総研大夏の体験入学のご案内

大学共同利用機関法人 自然科学研究機構  
核融合科学研究所

# 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。

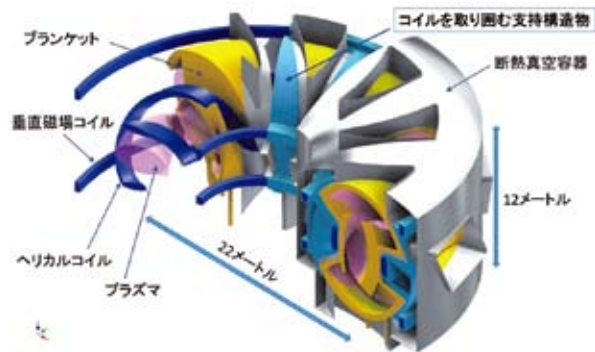


図1 発電実証ヘリカル型核融合炉の概略図。超伝導コイルは、2本のらせん状のヘリカルコイルと4本の円型の垂直磁場コイルで構成されます。超伝導コイルに働く強大な電磁力でコイルが動いたり変形したりしないように、高い強度をもつステンレス鋼で作られた支持構造物で強固に支えられています。

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

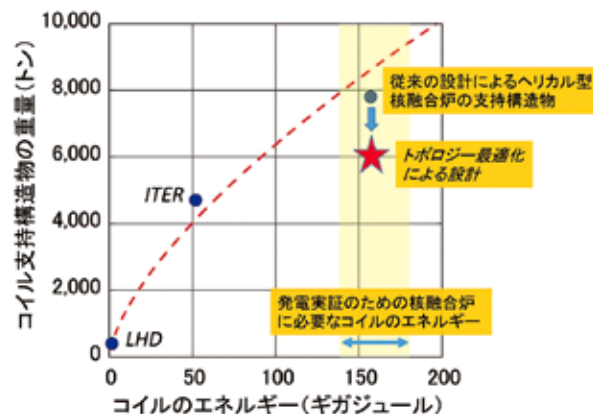


図2 コイルのエネルギーと超伝導コイルを取り囲む支持構造物重量の関係。支持構造物の重量はコイルのエネルギーが大きいくほど重くなりますが、より強い材料を使用するために直線的な増加にはならないと予想されます。

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

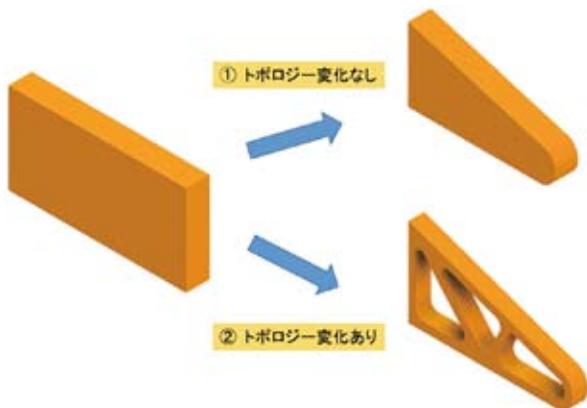


図3 構造物の設計方法。①トポロジーの変化がない状態で外周の寸法や形を変化させる方法。②トポロジーの変化を許容し強度に影響を与えない部分を取り去る方法。②はで強度を維持したまま大幅な減量が期待できます。

従来の設計

トポロジー最適化による設計



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）

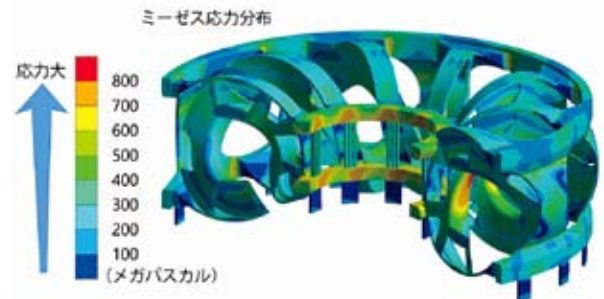


図5 トポロジー最適化後の支持構造物のミーゼス応力分布。ミーゼス応力は強度評価に用いられる数値指標で、この値が材料によって決まっている許容応力以下であれば構造物は問題なく力を支えることができます。計算の結果、ヘリカルコイルの底面、内側の垂直磁場コイル部分などに高い応力が発生していますが、ITER計画で開発された高強度ステンレス鋼などの使用により、許容範囲内となることが確かめられました。

# 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で、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年の国際学術交流協定締結以降、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

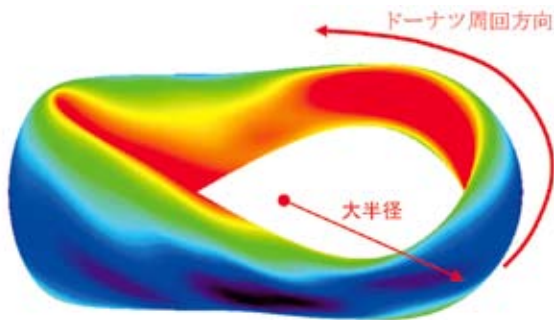


図1 スーパーコンピュータによる計算により得られた準軸対称ヘリカル型実験装置CFQSのプラズマ形状。色は磁場の強さを表しており、赤の場所で磁場が強く、黄、緑、青の順に磁場が弱いことを示しています。これまでのヘリカル型はコイルに近い場所で磁場が強くなっていましたが、CFQSでは、コイルの場所に関わらず、プラズマの内側で磁場が強く、外側で弱くなっていて、ドーナツ周回方向には磁場は変化しません。装置規模は、磁場強度が1テスラ、大半径（ドーナツの中心からプラズマの中心までの距離）が1メートルです。

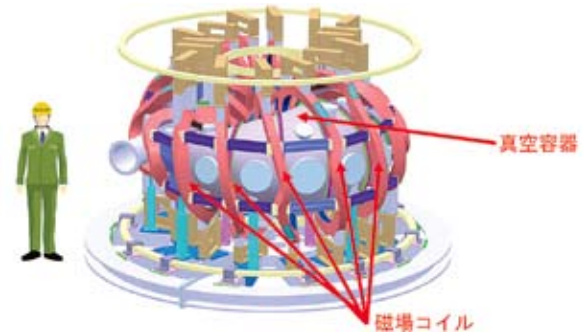


図2 CFQSの磁場コイルとプラズマを閉じ込める真空容器（淡いピンク色で示した部分）の概略図。真空容器を囲むように設置されたモジュラーコイルと呼ばれる磁場コイルがとても複雑な形をしていることが、この装置の特徴です。

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）

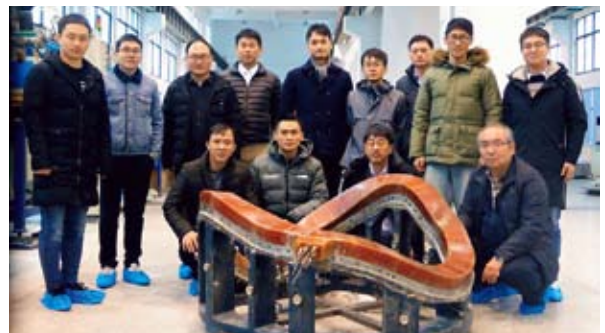


図3 磁場コイル試験体の完成写真。2020年1月に合肥Keye社の工場を視察しました。後ろに写っているのは、核融合科学研究所、西南交通大学の視察メンバー及び合肥Keye社の製作担当者です。CFQSの磁場コイルの中で、最も複雑な形状のものを試験的に製作しました。筆者は、前列右から二人目。

## 核融合科学研究所図書室

太田 雅子

核融合科学研究所図書室は、研究所正門の正面にある地上3階、地下1階の建物の中にあります(表紙写真)。

プラズマ・核融合の専門図書室で、以下の方針のもと、資料を収集しています。

- 1) プラズマ物理に関する図書
- 2) 核融合及び関連技術に関する図書
- 3) 物理学一般に関する図書
- 4) 工学及び自然科学一般に関する図書
- 5) 各種ハンドブック、辞典、データブック等
- 6) 1)~4) に関する学術雑誌
- 7) プラズマ物理学・核融合及び関連分野に関する会議録
- 8) その他レポート等

電子書籍・電子ジャーナルも契約しており、所内からインターネットを通じて利用できるようにしています。電子資料に関しては、図書室ホームページ (<http://library.nifs.ac.jp/>) からご利用ください(写真1)。

来室してのご利用は、平日9:00-17:00はどなたでもご利用いただけます。所外の方は、入室後、カウンターで利用申込書のご記入をお願いいたします。(共同研究者は記入の必要ありません。)

これ以外の時間(平日17:00以降翌日9:00まで、土曜日、日曜日、祝日)は研究所が発行するカードキーにて入室できます。

図書室内の利用できる設備は以下のものがあり



写真1：図書室ホームページ

ます。

- ・研究個室 3室

Windows又はMacのパソコンを1台設置。有線LANにてネットワークに接続できます。

- ・視聴覚個室 1室

テレビ、DVD、ブルーレイを視聴できる環境があります。

- ・簡易製本機 2台

製本したいものをお持ちいただければご自由にご利用いただけます。(消耗品は用意しております。)

- ・ロッカー

無料です。長期利用の場合は連絡ください。

- ・閲覧大テーブル、個人用閲覧机には所内LANケーブルを設置しています。

これらは、予約申込不要です。空いていればご利用いただけます。

前述の図書室ホームページは、昨年度に一新いたしました。所員・大学院生、共同研究者、一般利用者別に利用ガイドをご用意いたしましたので、(<http://library.nifs.ac.jp/guide>) こちらもご一読ください。

昨年度には、1階の集密書架も一新いたしました。これまでの電動からハンドル式(手動)になりました(写真2)。ご利用の際は、書架間(通路)に入る前に、書架が動かないよう必ず左右の書架をロックしてご利用ください。資料は以前と同じ場所にあります。ご利用にあたって不明な点は担当者にお尋ねください。

近年では、電子資料に限らず、図書室で所蔵し



写真2：1階集密書架



写真3：展示コーナー

ている資料を最大限に利用してもらうための取り組みとして、図書室入り口周辺に展示コーナーを設けています（写真3）。毎月設定したテーマに関する所蔵資料の紹介を行っており、多くの利用者に手に取ってご覧いただいています。

また、図書室の広い空間を利用して、人と人・人と資料をつなぐためのコミュニケーションの場を提供しようとLibrary Caféを月1回程度開催しています。Library Caféでは、研究内容の紹介や論文の探し方、趣味、文化など幅広いテーマで、教



写真4：Library Caféの様子（2018年11月27日）

職員・学生・留学生も交えてミニトークを実施し、毎回多数の方が参加しています（写真4）。（現在は新型コロナウイルス感染拡大防止のため休止中。）

最後に、図書室で行っている出版部門のご案内をいたします。研究所の紀要である、NIFS Series、英文年報の出版をしています。

前回の記事（No200）（<https://www.nifs.ac.jp/NIFS-NEWS/pdf/200-3.pdf>）と合わせてお読みいただければ幸いです。

（研究支援課学術情報係 係長）

## TOPICS

トピックス

### 2019年度吉川允二記念核融合エネルギー奨励賞を受賞

本研究所核融合理論シミュレーション研究系の河村学思助教が、「EMC3-EIRENEコードを基盤とした核融合周辺プラズマの三次元輸送モデル研究開発」の成果に対して、核融合エネルギーの実現に寄与しうる若手人材に贈られる「吉川允二記念核融合エネルギー奨励賞」を受賞しました。



河村学思助教

### 第14回日本物理学会若手奨励賞を受賞

本研究所核融合理論シミュレーション研究系の仲田資季准教授が、「磁場閉じ込めプラズマの乱流・輸送および同位体質量効果に関する研究」の成果に対して、第14回（2020年）日本物理学会若手奨励賞を受賞しました。この賞は、将来の物理学を担う優秀な若手研究者の研究の奨励のため、日本物理学会が設けているものです。

### 令和2年度科学技術分野の文部科学大臣表彰若手科学者賞を受賞

本研究所核融合理論シミュレーション研究系の仲田資季准教授が、「超高温プラズマにおける乱流抑制機構の解明と閉じ込め改善の研究」の成果に対して、令和2年度科学技術分野の文部科学大臣表彰 若手科学者賞を受賞しました。この賞は、萌芽的な研究、独創的視点に立った研究等、高度な研究開発能力を示す顕著な研究業績を挙げた若手研究者を対象としたものです。



仲田資季准教授

### 2019年度の研究成果をプレスリリース

核融合科学研究所では、核融合エネルギーの実現を目指して三つの研究プロジェクト～大型ヘリカル装置(LHD)計画、数値実験炉研究、核融合工学研究～を推進しています。これらの研究プロジェクトで得られた2019年度の主な研究成果に関して、4月17日にプレスリリースを行いました。

LHD計画プロジェクトの成果は「電子温度1億5,000万度イオン温度8,000万度のプラズマを実現」、数値実験炉研究プロジェクトの成果は「経済的核融合炉を実現するプラズマの高精度予測が可能に」です。これらの詳細は次号の研究最前線でご紹介する予定です。核融合工学研究プロジェクトの成果は「核融合炉のダイエットに成功」で、詳細は本号の研究最前線「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」をご覧ください。

### 2020年度総研大新入生の紹介

この春、国立大学法人 総合研究大学院大学(総研大) 物理科学研究科核融合科学専攻に5名(5年一貫制4名、3年次編入1名)の方が入学されました。連携大学院生も含めると14名の大学院新入生が核融合科学研究所で研究に励みます。また、この3月に4名(総研大生1名、連携大学院生3名)の方が博士号を取得し修了されました。新天地での活躍を期待しています。

### 2020年度総研大夏の体験入学のご案内

国立大学法人 総合研究大学院大学(総研大) 物理科学研究科核融合科学専攻では、大学院への進学を検討されている方々にプラズマ工学及び核融合工学に関連した最先端の研究を体験していただくことを目的として、2020年8月24日から28日にかけて夏の体験入学を開催します。核融合プラズマに関わる実験研究、核融合工学研究、プラズマ理論・シミュレーション研究等、約10課題の幅広い分野から興味のある課題を選択し、教員や総研大在学生の指導に沿って、少人数グループによる5日間の合宿形式で、核融合研究の最前線を体験していただきます。



榊原副専攻長による特別講義の様子



ポスター発表の様子



夏の体験入学ポスター

新型コロナウイルス感染症対策として中止や内容が変更になる可能性があります。最新情報は、核融合科学専攻ホームページ (<https://soken.nifs.ac.jp/>) をご確認ください。



大学共同利用機関法人 自然科学研究機構

核融合科学研究所 発行

NIFS NEWS

No.253

2020年4,5月号

〒509-5292 岐阜県土岐市下石町322-6  
TEL : 0572-58-2222(代) FAX : 0572-58-2601  
URL : <https://www.nifs.ac.jp/>  
E-mail : [nifs-news@nifs.ac.jp](mailto:nifs-news@nifs.ac.jp)

※過去のニュースはホームページにてご覧いただけます。

複写される  
方へ

本紙に掲載された著作物を複写したい方は(社)日本複写権センターと包括複写特許契約を締結されている企業の方でない限り、著作権者から複写権等の行使の委託を受けている次の団体から許諾を受けてください。

一般社団法人学術著作権協会 〒107-0052 東京都港区赤坂9-6-41 乃木坂ビル3F  
TEL:03-3475-5618 FAX:03-3475-5619 E-mail:info@jaacc.jp 著作物の転載・翻訳のような、複写以外の許諾は、直接本研究所へご連絡ください。