

NIFS NEWS

ISSN 1884-1600

NIFS

No.250



核融合科学研究所オープンキャンパス 2019 を開催

2019 OCT/NOV

>>> 特集 2-3

核融合科学研究所オープンキャンパス2019
「体感! 体験! プラズマエネルギー」

高畑一也

>>> 研究最前線 4-5

どんな時に磁気島はできるのか?

渡邊清政

>>> 特集 6

これまでの日中共同研究と今後の期待

森田繁

>>> 会議報告 7

第22回国際ステラレータ・ヘリオトロンワークショップ

高橋裕己

>>> トピックス 8

創立30周年記念事業 土岐市と科学イベントを実施
令和元年度防災訓練を実施

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

核融合科学研究所オープンキャンパス2019 「体感！体験！プラズマエネルギー」

高 畑 一 也

9月7日(土)に、毎年恒例の秋のイベント、オープンキャンパス（一般公開）を開催しました。今回で22回目となったオープンキャンパスは、「体感！体験！プラズマエネルギー」のテーマのとおり、楽しんで科学に触れることができる体験型イベントです。職員がアイデアを出し合って、自ら製作した科学実験などを企画するため、通常の科学館では見られない展示をご覧いただきました。今年度は、研究所が5月に創立30周年を迎えたことから、特設ブースを設けて、研究所の創立時からの歴史や活動を皆様にご紹介いたしました。また恒例となっているペットボトルロケット、こ

ども工作教室、マスコットキャラクターとの交流は、子ども達にも大人気です。もちろん、施設の一般公開として、ドラマの撮影にも使われた制御室、普段は見ることのできないスーパーコンピュータも間近にご覧いただきました。さらに大型ヘリカル装置（LHD）の内部を忠実に再現したバーチャルリアリティは臨場感があり、今年は500名近い方に体験いただきました。

LHDの見学は、室内が管理区域に設定されたため事前申込制となりました。昨年より多い120名を募集しましたが、予想より多くの方に申込をいただき抽選となりました。当選されなかった皆様



こども工作教室。今年は「光追っかけロボット」を作りました。



創立30周年記念展示の様子



土屋助教による講演会の様子



高い人気を誇る科学実験「不思議な液体」。片栗粉を水に溶かした液体に手を付けると固いのか？柔らかいのか？分からなくなる不思議な感触に。

も、是非来年のお申し込みをお待ちしております。

職員によるエネルギーや核融合に関する講演会も、例年人気を集めている企画です。今回は、土屋隼人助教による「子どもと学ぶエネルギー～風車から核融合まで～」、村上泉教授による「知っているようで知らない太陽のこと」の2部構成で講演会を開催しました。どちらも50名近い方に聴講いただきました。

オープンキャンパスでは、地元少年サッカーチームによる交流大会も同時開催しています。18回目となる今回の大会も白熱した試合が繰り広げられました。16チームの中から栄誉あるNIFS杯を獲得したのは、可児市の中部サッカースポーツ少年団でした。

当日は晴天に恵まれ、約1,400名の方々にご来場いただきました。アンケートでは、「毎年楽しみ



青空の下、ヘリカちゃん、プラズマくんと一緒に輪投げをして遊びました。



大型ヘリカル装置（LHD）の周辺や内部を、3D画像で忠実に再現した話題のバーチャルリアリティで体験しました。

にしています」「スタッフが親切だった」「小さな子どもも一緒に楽しめた」といった嬉しいご意見をいただきました。皆様からいただいたご意見を参考に、来年もさらに充実した内容、分かりやすい展示、公開を企画いたします。皆様のお越しを心よりお待ちしております。

（装置工学・応用物理研究系 教授／
オープンキャンパス2019実行委員長）



子ども達に大人気のペットボトルロケット

どんな時に磁気島はできるのか？

渡 邊 清 政

核融合発電炉を実用化するには1億度以上のプラズマ状態の燃料（重水素と三重水素の原子核と電子の集まり、以下プラズマ）を閉じ込めて、高温状態を長時間保つ必要があります。プラズマはドーナツ形状の磁場の容器を使って閉じ込めますが、この容器は磁力線でできていて、磁力線はドーナツの表面をねじれながらトロイダル方向に回転しています(図1)。磁力線をトロイダル方向に追跡していくと、ねじれがあるのでポロイダル方向にも回転し、1周すると元の場所とは違う場所に戻ってきます。磁力線が1周ごとに違う場所に戻ることから全体として網目のような面状になり、これは「磁気面」と呼ばれています。磁場容器は幾層にも重なった無数の磁気面でできています。プラズマは磁力線にそって動きやすいので、ほぼ一つの磁気面の中だけを移動して、他の層の磁気面には移動し難いことから、外に逃げ出すことなく、うまく閉じ込められています。

一般的な磁場容器では、磁力線のねじれの強さは磁気面によって異なります。このため、磁場容器を構成している磁力線の中には、トーラス方向に何周かすると出発点と同じ場所に戻ってきてしまうものがあります。このような閉じた磁力線の無数の集まりで構成されている磁気面を、特に「有理面」と呼んでいます。この有理面の位置に、図2の緑色で示すような「磁気島」と呼ばれる構造が形成されることがあります。この構造は川の中にある島のように見えることから磁気島と呼ばれています。磁気島ができると、磁場容器の内側と外側の磁気面がつながってしまい、プラズマの閉じ込め性能が悪くなってしまいます。そこで、磁気島が、なぜ、どんな時に作られるかについて様々な研究が行われてきました。ここでは、特に、大

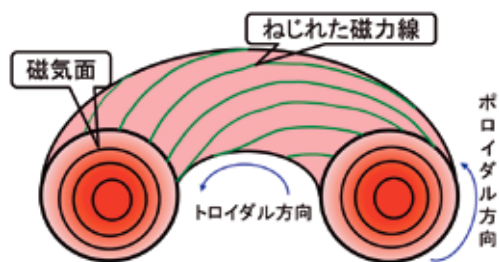


図1 磁力線で編まれた磁気面とドーナツ半周でカットした層状の磁気面で構成される磁場容器の概念図

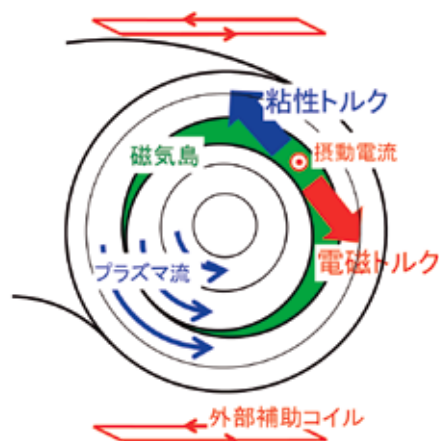


図2 磁気島とプラズマ回転、ならびに磁気島に働く電磁トルク（プラズマ摂動電流と外部補助コイルによる摂動磁場による）と粘性トルク概念図

型ヘリカル装置（LHD）で行っている、磁気島ができる条件を探る研究を紹介します。

磁気島の形成の原因として注目されているのが摂動磁場です（摂動というのはLHDの超伝導コイルシステムが作る磁場と比べて小さく副次的なものという意味です）。特に、有理面上の磁力線と共鳴するような摂動磁場を外部補助コイルにより加えると、磁気島が形成されることが観測されています。ただし、必ず磁気島が形成されるわけではありません。LHD実験では同じ強さの摂動磁場を加えた場合でも、プラズマ密度などの違いによって磁気島が形成される場合と、形成されない場合

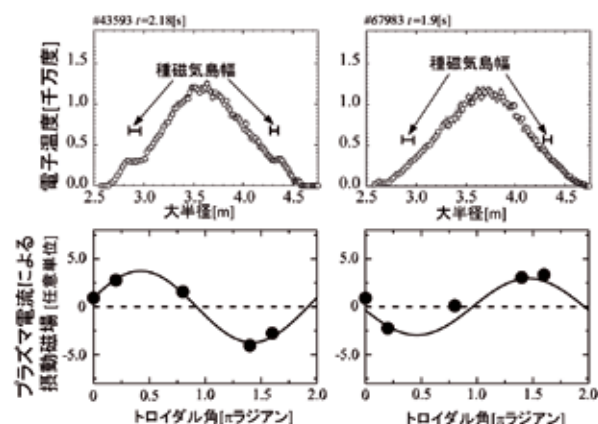


図3 磁場強度、密度の異なるプラズマの電子温度分布（上図）とプラズマ中の摂動電流が作る摂動磁場のトロイダル角方向依存性（下図）。上図の「種磁気島」は外部コイルによる摂動磁場により予想される磁気島幅。

があります。磁気島が形成されたかどうかは、電子の温度分布を測定して判定することができます。これは、磁気島ができると磁気島の中では熱が容易に移動できるようになるために、磁気島の中の温度がほぼ一定となって温度分布が平らになるからです。図3に同じ強さの摂動磁場をかけた時の電子温度の分布を二例示します。平らな部分の有無から左上図では磁気島が形成され、右上図では形成されていないことが分かります。また、プラズマの内部に流れる摂動電流が作る磁場を測ることによっても磁気島の形成を判定することができます。外部補助コイルによる摂動磁場（以降、外部摂動磁場と記す）を強めるように電流が流れる（左下図）ときは、大きな磁気島が形成され、外部摂動磁場を打ち消すように電流が流れる（右下図）と磁気島は小さくなり、完全に打ち消されることもあります。

それではなぜ磁気島を打ち消すような電流が流れるのでしょうか？ 理論的には、プラズマの回転が大きく関与していると考えられています。図2に示すように、ポロイダル方向のプラズマの流れがあってプラズマが回転していると、有理面付近に外部摂動磁場を打ち消すような摂動電流が流れます。これにより、外部摂動磁場が有理面の位置まで浸透できなくなり、磁気島が形成されないと予測されています。しかし、外部摂動磁場が大きくなると、以下のメカニズムによって、磁気島が現れると推定されています。外部摂動磁場が大きくなると、それによって誘起された有理面付近の摂動電流と外部摂動磁場による電磁トルクが大きくなります。この電磁トルクは、プラズマの回転を減速させます（図2）。一方、プラズマの回転は流体力学的な観点によると粘性トルクにより維持されています。このため、電磁トルクが駆動力である粘性トルクより大きくなると、プラズマの回転が止まり、外部摂動磁場が有理面まで浸透することができるので磁気島が現れることになります。

この理論予測を検証するために行った実験の結果を図4に示します。これは、外部摂動磁場を徐々に強めていき磁気島が現れた時の強さ（以降、外部摂動磁場の閾値と記します）を、ポロイダル方向のプラズマ回転周波数の関数として示したものです。なお、ここでは、その閾値を外部補助コイルに流した電流値で表しています（電流値が大きいほど、外部摂動磁場の閾値が大きいです）。図4

には、最近LHDで開始された重水素プラズマ実験の結果も含まれていて、重水素プラズマでは、軽水素プラズマに比べて小さい摂動磁場でも磁気島が形成されやすいことを示しています。この結果には、次のような意義があります。今回紹介した実験では、外部補助コイルを用いて摂動磁場を意図的に作りましたが、摂動磁場は磁場容器を作るコイルのゆがみや周囲にある磁性体の影響でも発生します。このような意図しない摂動磁場を抑えるためには、コイルの製作精度の向上、摂動磁場の抑制手法の開発、摂動磁場を吸い込む磁性体の利用や配置の最適化が必要です。主として重水素が使用されることが予想される核融合炉においては、このような研究がより重要であることが、本実験結果により明確になりました。

図4には、最近LHDで開始された重水素プラズマ実験の結果も含まれていて、重水素プラズマでは、軽水素プラズマに比べて小さい摂動磁場でも磁気島が形成されやすいことを示しています。この結果には、次のような意義があります。今回紹介した実験では、外部補助コイルを用いて摂動磁場を意図的に作りましたが、摂動磁場は磁場容器を作るコイルのゆがみや周囲にある磁性体の影響でも発生します。このような意図しない摂動磁場を抑えるためには、コイルの製作精度の向上、摂動磁場の抑制手法の開発、摂動磁場を吸い込む磁性体の利用や配置の最適化が必要です。主として重水素が使用されることが予想される核融合炉においては、このような研究がより重要であることが、本実験結果により明確になりました。

今後は、磁場容器の形状やプラズマの種類、プラズマの状態などによる磁気島の発生条件の研究をさらに深めることで、核融合研究の進展に貢献していきます。

（高密度プラズマ物理研究系 教授）

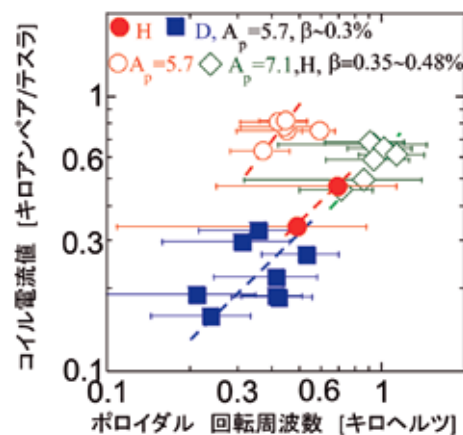


図4 磁気島が形成される外部摂動磁場の閾値（閾値は外部補助コイルに流した電流値で表しています）をプラズマのポロイダル回転周波数の関数として示しました。様々な実験条件の結果をまとめて示していて、Hは軽水素、Dは重水素、 A_p はアスペクト比（磁場容器のドーナツの大半径と小半径の比）、 β はプラズマのベータ値です。

これまでの日中共同研究と今後の期待

森田 繁

中国での改革・開放政策に基づく核融合研究の公開化を受けて、1980年代後半頃から日中間での人材交流が始まりました。中国での核融合研究の進展を受け、より緊密な日中共同研究への期待が高まり、日本学術振興会と中国科学院との拠点大学方式学術交流事業 プラズマ・核融合分野「先進核融合炉の炉心と炉工学に関する研究」(CUP事業) が2001-2010年の10年計画として開始されました。中国科学院等離子体物理研究所(ASIPP: 合肥市)と核融合科学研究所(NIFS: 土岐市)を拠点とし、西南物理研究所(SWIP: 成都市)や日本原子力研究所(JAERI: 那珂市、現量子科学技術研究開発機構 QST)を初めとする中国及び日本の大学・研究機関が交流事業に参加し、プラズマ実験・理論・炉工学の分野で幅広い研究交流を展開しました。

CUP事業終了後1年の空白期間を経て、「高性能プラズマの定常保持に必要な物理基盤の形成」と題する「日本学術振興会日中韓フォーサイト事業(A3事業)」が2012年8月に5か年計画として首尾よく採択されました。プラズマ定常維持・周辺プラズマ制御・高エネルギー粒子閉じ込めを主要課題として、日中韓の超伝導装置(LHD・EAST・KSTAR)を中心に日中韓の大学・研究所間で交流事業を実施しました。筆者はA3事業の日本側研究代表者として交流事業を推進するとともに、全体を統括する役割も担いました。A3事業ではセミナーを年2回開催し、交流事業の状況確認・新規共同研究の立案に加え、大学院生等に口頭発表の機会を設け若手研究者の育成に努めました。セミナーを開催することにより研究者間の意思疎通が格段に円滑になり、結果として多くの論文や招待講演を共同研究成果として発表することができました。CUP事業を含め、交流期間中には多くの中国人学生が総研大に入学し、学位を取得しました。日本人学生の中国滞在と併せ、外国での長期滞在を経験することで研究者としての視野拡大に大きく貢献しました。多くの中国人卒業生は中国の大学・研究機関に就職し、様々な分野で研究活動に従事しており、現在では日中交流の中心的な役割を担っています。科学技術振興機構による「日本・アジア青少年サイエンス交流事業さくらサイエンスプラン」(図1)を含め、これまで非常に多くの

中国人学生・若手研究者と接してきましたが、性格は総じて非常に明るく、積極的な言動・教員への敬意・人と人との距離の近さ・研究に対する真摯な態度等、日中交流事業が発展してきた大きな要因と確信しています。結果として過去15年の日中交流を通して、共同研究は飛躍的に進展しました。今日の日中交流事業の発展は多くの方々のご支援の賜物です。感謝申し上げます。

現在中国では、多くの新規計画が立案・実行されています。国際熱核融合実験炉(ITER)の中国版ともいえるCFETR装置については、全ての大学・研究機関の協力の下、ASIPP近郊での新キャンパス建設と装置設計開発に着手しました。北京近郊の廊坊市にあるENN新エネルギー会社付属研究所では、総研大卒業生を含め多くの若手研究者を国内外から雇用し、球状トカマク装置・EXL-50の運転を2019年8月に開始しました。NIFSが主導する中国初のステラレータ装置・CFQS(成都市: 西南交通大学)は2021年9月の運転を目指して建設中であり、HL-2Mトカマク装置(SWIP)は長期にわたる建設期間を経て2020年5月に運転を開始する予定です。また、J-TEXTトカマク装置(武漢市: 华中科技大学)では、ヘリカルコイルを付加したハイブリッド装置への転換を計画しており、南華大学・深圳大学・浙江大学等では新たな核融合実験装置の導入を模索中です。日本でもJT-60SAトカマク装置(QST)が2020年の稼働を目指しており、日中交流事業も新たな時代を迎えます。日中間での核融合研究の更なる展開を良い契機として、益々の日中交流事業の発展を期待しています。

(核融合科学研究所 名誉教授)



図1 さくらサイエンスプラン(中国科学技術大学修士課程大学院生と名古屋・トヨタ産業技術記念館を訪問)

第22回国際ステラレータ・ヘリオトロンワークショップ

高 橋 裕 己

9月23日から27日までの5日間、米国ウィスコンシン州のウィスコンシン大学マディソン校で、第22回国際ステラレータ・ヘリオトロンワークショップ (ISHW) が開催されました。本会議は隔年で開催されており、ヘリカル系の核融合プラズマ研究の分野において、最も規模が大きく、また、歴史のある会議です。会議には、米国、オーストラリア、EU、中国、日本、ロシア、ウクライナ等から多数の研究者が参加し、総数145件（招待講演30，口頭発表19，ポスター発表96）の発表があり、活発な議論が行われました。図1に会議参加者の集合写真を示します。

核融合科学研究所からは24件の発表が行われ、大型ヘリカル装置 (LHD) の最近の成果や新配位設計等の成果が報告されました。筆者はLHDで行われた重水素実験でのプラズマ性能向上の進展として、特にプラズマの高温化の成果について招待講演を行いました。また、同研究所の徳澤准教授の招待講演では、核融合研究において長年のミステリーとなっている同位体効果について、LHDの最新の研究成果が発表され、高い関心を集めました(図2)。

2015年に実験を開始したドイツのWendelstein 7-X装置 (W7-X) は、現在、最も勢いのある装置の一つです。会議ではW7-Xの最新の実験成果が紹介され、プロジェクトが順調に進展していることや、今後の加熱増強やダイバータ改修の計画、また、LHDとW7-Xとの装置間比較研究の成果等が報告されました。W7-Xでは今後、より大きな加熱電力を用いたコアプラズマ閉じ込め研究やダ



図3 ポスター会場の様子。写真中央にCFQSの3D模型が展示されている。

イバータ物理研究が進展する見通しです。

また本会議ではプラズマ閉じ込め手法やコイル形状の最適化研究についての多数の発表があり、次世代のプラズマ閉じ込め装置を見据えた研究が活発化している印象を受けました。核融合科学研究所でも、先進的なヘリカル研究の推進を目的として、中国の西南交通大学との国際共同プロジェクトを展開しています。本プロジェクトにおいて、核融合科学研究所の主導の下に最適化研究・装置設計が行われた準軸対称ヘリカル装置CFQSは、まもなく建設に着手する予定です。図3にポスター会場を示します。同会場ではCFQSの3D模型を展示し、多くの研究者の注目を集めました。

次回のISHW会議は2021年にポーランドのワルシャワで開催される予定です。

(プラズマ加熱物理研究系 准教授)



図1 会議参加者の集合写真



図2 徳澤准教授の招待講演の様子

TOPICS

トピックス

創立30周年記念事業 土岐市と科学イベントを実施

核融合科学研究所は、創立30周年記念事業として、土岐市教育研究所と共同で8月31日(土)に科学イベント「科学体験パワーアップ講座」を実施しました。主に土岐市内から、小学校5・6年生24名とその保護者等29名の方々にご参加いただきました。

開会式では、竹入所長及び土岐市の山田教育長から挨拶がありました。この講座には、「初めてのプログラミング、ドローンを飛ばそう」と「超伝導リニアモーターカーでレース&テニス」の二つのコースがあり、参加者は、希望したコースに分かれて課題に挑戦しました。プログラミ



直線コースを走る超伝導リニアモーターカー

ングをテーマとしたコースでは、教育用プログラミング環境「Scratch」を使って、ドローンの競技会にチームを作って挑戦しました。また、超伝導をテーマとしたコースでは、磁気浮上や電磁石等について実験を通じて学んだ上で、手の平サイズの超伝導リニアモーターカーを作ってレースを行うなどチームごとに競争しました。

閉会式では、土岐市の長谷川教育次長から「今日の経験を活かして、これからも科学に興味を持っていろいろなことに挑戦してほしい」との講評があり、続いて、竹入所長から参加者に講座の修了証が授与され、成績優秀チームの表彰が行われました。



プログラミングでドローンが飛行

令和元年度防災訓練を実施

核融合科学研究所は、9月17日(火)に、土岐市南消防署の協力を得て防災訓練を実施し、職員や学生など354名が参加しました。

訓練は、9時30分に南海トラフを震源とする震度6弱の地震が発生し、研究Ⅱ期棟3階給湯室より電気火災による出火、研究Ⅰ期棟2階事務室で棚が倒れ職員が足を負傷したという想定の下、危機管理指揮本部内に災害対策本部を立ち上げて実施しました。

訓練では研究所の職員で構成される自衛消防隊が、岐阜県・三市（土岐市、多治見市、瑞浪市）等の関係機関への通報、電気・ガス・水道等のライフライン状況確認、実験設備の高圧ガス・危険物質等における安全確認の活動を迅速に行い、併せて地震災害を想定した負傷者の救護、電気火災への対応を行いました。隊員以外の職員らは、研究所構内に指定された一時避難場所へ速やかに避難し、安否情報確認を行いました。



自衛消防隊員(本部隊)の活動開始



地元石拾地区の方も参加して行われた消火栓取扱い訓練

今年度の訓練には、昨年度の訓練の見学に続いて、地元土岐市下石町石拾地区の代表の方々に、一時避難や屋内消火栓の取扱い訓練等に参加していただきました。

今年度も、自衛消防隊に詳細なシナリオを知らせず実施するなど、より実践的な訓練となり、土岐市南消防署からは、「自衛消防隊によるそれぞれの役割について、訓練同様、有事の際にもしっかりと対応できるよう準備願いたい。」との講評がありました。



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.250

2019年10,11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 : <http://www.nifs.ac.jp/>
E-mail : 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。

一般社団法人著作権者会 〒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、直接本研究へご連絡ください。