ISSN 1884-1600

NIFS NIEWS

NIFS

No.249



夏の体験入学

2019 AUG/SEP

>> 特 集・・・・2-3

総研大・核融合科学専攻「夏の体験入学」

大谷寛明

>>> 研究最前線 ・・・・ 4-7

NIFS発の計測技術の国際展開で進める ヘリカルプラズマにおける不純物輸送研究

田村直樹 宇佐見俊介

磁気再結合におけるプラズマ加熱の粒子シミュレーション

>>> トピックス・・・・8

核融合科学研究所創立30周年記念市民学術講演会を開催しました 市民説明会を開催しました

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

総研大・核融合科学専攻「夏の体験入学」

大谷寬明

8月26日から30日までの5日間の日程で、核融 合科学研究所(以下「NIFS」)において、「夏の体 験入学」を開催しました。

NIFSに併設されている国立大学法人・総合研究 大学院大学(以下「総研大」)・物理科学研究科・ 核融合科学専攻では、2004年から毎年「夏の体 験入学」を開催しています。本専攻では、「夏の体 験入学」を総研大核融合科学専攻の志望者獲得を 第一義的な目的とし、さらに、将来の核融合エネ ルギーの実現に向けた人材育成、社会への情報発 信・広報等にも大変有用な企画であることから、 大学の1年生から4年生、及び、高等専門学校の4、 5年生と専攻科生を対象に行ってきました。16回 目となる今回は、34名(内訳:大学生25名、高 専生9名)が参加しました(写真1)。参加学生た ちは、研究所内にある宿泊施設「ヘリコンクラブ」 に宿泊しながら、核融合研究の最前線を体験しま した。

核融合科学の研究は、プラズマ物理学、原子物理学、電気工学、低温・超伝導工学、材料工学、真空工学、シミュレーション科学など多岐にわたっており、これらが密接に結びついて進められていることから、本専攻には幅広い専門分野の教員

が揃っています。今回の体験入学には、プラズマ実験・加熱・計測系から6課題、核融合工学系から4課題、解析・理論・シミュレーション系から3課題の計13の課題が用意され、学生たちは、申込時に表明していただいた希望に沿って配属されました。

体験入学の1日目は、開校式の後、各研究課題のテーマ概要説明、担当教員と大学院生ティーチングアシスタントの紹介、及び参加学生の自己紹介後、LHDの実験設備並びにシミュレーション施設見学を行い、参加した学生は世界有数の研究設備を目の当たりにして感心している様子でした。その後、研究所内の食堂で懇親会を催し、終始和やかな雰囲気の中、参加学生は教員や在学生との交流を深めていました。

実習が行われる2日目から4日目までは、毎日朝 礼で始まりました。朝礼後、いよいよ参加学生は 配属された各課題実習に取り掛かりました。いず れも担当教員が実際に取り扱っている実験機器や 計算機を用いて、専門的な研究課題に熱心に取り 組んでいました(写真2)。2日目の午前中に、榊 原悟副専攻長による特別講義(写真3)があり、 参加学生は、研究開発が進められている核融合発



写真1 参加学生と教員・在学生との集合写真

NIFS NEWS



写真2 研究体験の様子



写真3 榊原副専攻長による特別講義の様子

電の原理、大型ヘリカル装置(LHD)に代表され る磁場閉じ込め核融合プラズマ研究の概要や研究 課題、将来のエネルギーシステムなどについて学 びました。2日目の課題実習を終えた後、研究者 へのキャリアパスに関心のある学生を対象に、へ リコンクラブの交流サロンでキャリアビルディ ングを開催しました。本企画は任意参加でした が、結果、ほぼ全ての学生が出席し大盛況でした。 NIFSの若手研究者2名をパネリストに迎え、座談 会形式で、どういった道筋を経て核融合研究者に なったのか、研究者になるために大事なことは何 か、など、いくつかのテーマでパネリストの経験 から発表が行われ、それに対する学生との質疑応 答が和やかな雰囲気の中で行われました。学生は 皆パネリストの話を熱心に聴いて、研究内容に関 することから私生活に至るまで、各々関心のある ことをパネリストに質問し、大変参考になったよ うです。

5日目最終日の報告会では、実習成果の概要を 要領よくまとめて各課題1分で口頭発表するプレ ポスター発表を行いました。その後、苦労して仕 上げたポスターが掲示された会場で、報告会参加 者らに対して実習の詳しい内容の説明を行いました。学生たちは、結果だけでなく体験を通して学んだことを活き活きと発表していました。報告会には、今回課題を担当した指導教員だけでなく、他の教員や在学生など多数の参加があり、会場は活気に溢れていました。(写真4)。

報告会の後、竹入康彦専攻長からの挨拶、NIFSの岡村昇一特任教授から各発表に対する講評、榊原悟副専攻長からの専攻紹介及び入学案内、並びに閉会の挨拶があり、全日程を終了しました。

最終日に参加学生が提出した体験入学についてのアンケートからは、本事業への満足度が大変高いことが伺えました。また、ここ数年、過去に本事業に参加した学生が本専攻を受験しており、総研大の広報事業としての成果が目に見えるようになってきています。体験入学に参加した学生の中から、数年後、将来の核融合研究を担う研究者が現れてくれることを期待しています。なお、これまでの体験入学の課題概要や参加学生の体験談などを総研大核融合科学専攻のホームページ(https://soken.nifs.ac.jp/open/)で公開しています。

最後に、本体験入学は、総研大の「新入生確保のための広報的事業」及び核融合科学研究会からのご支援により実施することができました。ここに厚く御礼申し上げます。

(基礎物理シミュレーション研究系 准教授 総合研究大学院大学・物理科学研究科 核融合科学専攻/併任)



写真4 ポスター発表の様子

NIFS発の計測技術の国際展開で進めるヘリカルプラズマにおける不純物輸送研究 田村 直樹

将来の核融合炉では、燃料となる水素同位体及 びプラズマを加熱する高エネルギーヘリウム以外 の粒子を不純物と呼びます。これら不純物の主な 発生源は、プラズマを閉じ込める真空容器などで すが、重水素と三重水素の核融合反応によって生 じる高エネルギーヘリウムも、プラズマにエネル ギーを与えるという役目が終わると、同様に不純 物となります(エネルギーを失ったヘリウムは、 燃えかすという意味からヘリウム「灰」と呼んで います)。不純物は、プラズマのエネルギーを吸収 し光として放出してしまうため、不純物の量が増 えるとプラズマの温度が下がり、核融合炉の出力 が低下してしまいます。このため、核融合炉に必 要な高温プラズマをできるだけ長時間にわたって 維持するためには、プラズマ中の不純物の量をで きるだけ少なくする必要があります。核融合科学 研究所の大型ヘリカル装置(LHD)を始め様々な 磁場閉じ込め核融合プラズマ実験装置では、プラ ズマ中の不純物の量を減らす方法を見いだすべく、 不純物をあえてプラズマに注入してプラズマ中の 不純物の振る舞いを明らかにする実験を行ってい ます。

これまで、不純物を高温プラズマに注入するために、プラズマの外から、1)ガスとして吹きかける、2)小さい固まり(ペレットと呼んでいます)にして吹き矢の原理で飛ばす、3)強いレーザー光

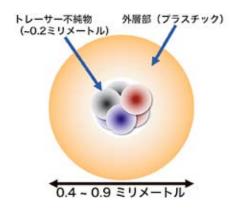


図1 トレーサー内蔵固体ペレット(TESPEL)の模式図

で蒸発させて飛ばす(レーザー・ブローオフ法と呼んでいます)、などの方法が行われてきました。しかし、いずれの方法にも共通した問題点があり、実験の精度を上げる上での課題となっていました。その原因は、磁力線でできたカゴで閉じ込められた高温プラズマの周りに広がっている、比較的低温のプラズマ領域にあります。プラズマの外から注入された不純物の一部は、この低温プラズマにも入り込んでいきます。このため、先述の1)から3)の方法では、高温プラズマにどれくらいの量の不純物が入ったか正確には分からないのです。

そこで核融合科学研究所では、この不純物を 注入する実験の精度を上げるために、トレーサー 内蔵固体ペレット (Tracer-Encapsulated Solid Pellet: TESPEL) を開発しました。TESPELは高 温プラズマ中に注入したいトレーサー不純物をプ ラスチックで包んだ、二層構造をしたペレットで す(図1参照)。この構造により、高温プラズマの 周りにある低温プラズマを通過している間は、外 層部のプラスチックの部分だけが溶けるため、ト レーサー不純物を全て高温プラズマの中に注入す ることができるのです。さらに、外層部のプラス チックの厚みを調節することで、注入する位置を 変えることができます。つまり、TESPELを使う ことで、これまでの不純物注入法ではできなかっ た、既知の量の不純物をプラズマ中の任意の位置 に注入することができるようになりました。この 効果をみなさんの身近なものに例えるなら、胃で 溶けずに腸で溶ける整腸剤でしょうか。LHDでは、 このTESPELを用いて、これまで知られていなか ったプラズマ中の不純物の振る舞いを明らかにし てきました。

ところで、先述のとおり、高温プラズマ中の不 純物の振る舞いに関する研究は、LHDも含めて 様々な実験装置で行われています。これは、ある 物事を調べるとき、一つの観点からだけでは分か らないことがあるからです。例えば、ある方向か ら見て『円』だと思ったものが、別の方向から見 て『三角形』だった場合、その時初めてそれが『円錐』

NIFS NEWS

だったことが分かります。このように、ある物事 を様々な視点で調べることは、その物事の本質を 知る上で大変重要です。このことは、核融合プラ ズマ研究においても同様です。プラズマ中のある 現象を一つの装置で調べて分からなくても、別の 装置で調べ、比較することで分かることがありま す。ここでさらに重要なポイントが、その調べ方 です。例えば、モノの長さを正確に比較したい時、 同じ定規を使った方がいいことは、みなさんもす ぐにお分かりいただけると思います。そこで核融 合科学研究所では、異なる実験装置で得られる 実験結果を正確に比較できるように、国際共同研 究プロジェクトとして、TESPELをスペインのエ ネルギー環境技術研究センターの中型ヘリカル装 置TJ-IIなどに導入してきました。そして、2018 年には日独の国際共同研究プロジェクトとして、 LHDと同規模のヘリカル型プラズマ実験装置であ る、ドイツのマックス・プランクプラズマ物理研 究所のWendelstein 7-X (W7-X) にTESPELを 導入しました。図2に、W7-Xに取り付けられた TESPELをプラズマに入射するための装置の写真 を示します。TESPEL格納ディスクに装填された TESPELは、後方に取り付けられた加速ガス噴出 弁から瞬間的に噴き出す30気圧という高圧のヘリ ウムガスによって加速、押し出され、プラズマに 向けて飛んで行きます。一方、加速ガス自体は不 要なので、プラズマに入れないようにするために、 TESPELが通っていく経路の途中には、加速ガス を排気するための真空容器と真空ポンプの組合せ

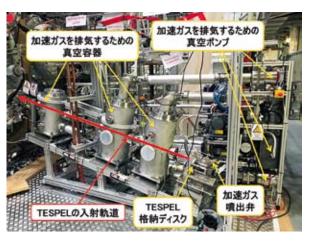


図2 ドイツのマックス・プランクプラズマ物理研究所のヘリカル型プラズマ実験装置Wendelstein 7-Xに取り付けられたTESPEL入射装置

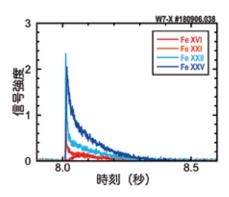


図3 W7-Xで生成されたプラズマにTESPELを使って鉄を注入した実験の結果の一例。TESPELによって注入された鉄の多価イオンからの発光信号が示されている。

を3系統設けています。これにより、世界最大級 のヘリカルプラズマ中の不純物の振る舞いを正確 に比較できる環境が整ったと言えます。

図3に、W7-Xで生成されたプラズマにTESPEL を使って鉄を注入した実験の結果の一例を示しま す。この場合、TESPELは時刻8秒付近でプラズマ に入射されています。通常、プラズマの温度に応 じて、様々な価数の鉄イオンができますが、高い 価数のイオンができるためには、高いプラズマ温 度が必要です。レーザー・ブローオフ法をはじめ とする従来の注入法で不純物をプラズマに注入し た場合、不純物はプラズマの温度が低い領域から 高い領域へ徐々に侵入していきます。そのため、 より価数の高いイオンからの発光信号は、不純物 が注入されて少し時間が経過してから観測されま す。図3が示すように、TESPELによって鉄が注入 された直後からFe XXV発光信号が観測されている ことは、TESPELによって鉄がプラズマの温度が 高い領域に直接注入されたことを意味しており、 W7-XにおいてもTESPELがうまく機能しているこ とを示しています。この実験では、鉄は0.1秒程 度の減衰時定数でプラズマから排出されることが 分かりました(プラズマ中に最も多く存在する24 価の鉄イオンからのFe XXV発光信号(図3中青線) から評価)。その一方で、実験条件を変えると、不 純物がプラズマ中に長く留まっている結果も得ら れています。今後、LHDで得られている実験結果 との詳細な比較を進めていくことで、ヘリカルプ ラズマにおいて不純物をできるだけ少なくするた めに必要な知見の総合化を目指す予定です。

(高温プラズマ物理研究系 准教授)

磁気再結合におけるプラズマ加熱の粒子シミュレーション 宇 佐 見 俊 介

プラズマには、「磁気再結合」という、互いに向きの異なる磁力線がつなぎ変わる現象がありますが、その詳細な物理機構はいまだ完全には解明されていません。磁気再結合は、太陽フレアやオーロラの発生などに深く関わっていると注目されており、宇宙のプラズマ現象を人工衛星により観測する形での研究が世界中で活発に進められています。

一方、地上でのプラズマ実験により、磁気再結 合の詳細な機構を調べる研究も進められています。 東京大学の球状トカマク(ST)装置(TS-6)などで は、二つのトーラスプラズマを合体させて、磁気 再結合を起こし、その性質を調べています。また、 将来のSTを用いた小型の核融合炉を目指し、磁気 再結合によるプラズマ加熱の実験を行っており、 最大40%を超えるベータ値(プラズマ圧力を磁気 圧力で割った値)のプラズマが生成されています。 ところが、磁気再結合によるプラズマ加熱の詳細 な機構は分かっていません。それが解明されれば、 STのプラズマの加熱効率向上につながる知見が得 られるとともに、宇宙プラズマ研究への応用も期 待できます。そこで、本研究では、磁気再結合に よるプラズマ加熱の機構を解明するため、東京大 学の小野靖教授のグループと共同で、STにおける

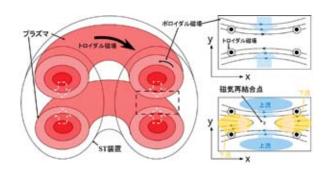


図1 球状トカマク装置における、二つのトーラスプラズマの合体の模式図。実験装置は球に近いドーナツの形をしていますが、ここでは、その断面を示します。二つのプラズマの境界付近で磁気再結合が起こります。左図のポロイダル面の点線で囲まれた領域をシミュレーションします。右はその領域の拡大図で、上が磁気再結合が起こる前を、下が磁気再結合の様子を示します。

磁気再結合について、研究所のスーパーコンピュータであるプラズマシミュレータを用いてシミュレーションを行いました。

図1は、STにおける、二つのトーラスプラズマの合体の模式図です。トーラスの周回方向(トロイダル方向)にトロイダル磁場が、断面(ポロイダル面)内にポロイダル磁場が存在します。二つのプラズマの境界付近で磁気再結合が起こりますが、ここでは、ポロイダル面内の点線で囲まれた領域について、シミュレーションを行います。以降、この面をxy平面と表します。右側の拡大図は、上が磁気再結合が起こる前で、下が磁気再結合の様子を示します。薄青矢印で示す上下から挟み込むようなプラズマの流れの影響で、向きの異なる磁力線が近づいて、つなぎ変わります。すると、この磁気再結合点からオレンジ色で示す下流へと向かうプラズマの流れが作られるとともにプラズマが加熱されると考えられています。

このような磁気再結合の詳細な機構を調べるた めには、粒子間衝突の効果が小さく、粒子の速度 分布がMaxwell分布とは異なる可能性があること を考慮する必要があります。そこで本研究では、 プラズマ粒子一つ一つの運動方程式と、それらの 粒子が作り出す電磁場の発展方程式を計算する 「粒 子シミュレーション」と呼ばれる手法を用います。 この手法では、微小領域に存在する粒子一つ一つ の速度を記録して集計することで、粒子の速度 分布を調べます。また、温度はMaxwell分布が成 立する場合に定義されるものですが、速度分布が Maxwell分布とは異なる場合にも拡張するために、 実効的温度を導入します。実効的温度は粒子の速 度分布の広がりに相当するもので、実効的温度が 高いとは、粒子の速度分布が広がっていることを 意味します。本稿では以降、実効的温度を「温度」 と記します。

では、シミュレーション結果を見てみましょう。 図2の上段は磁力線(黒線)とイオン温度(カラ

NIFS NEWS

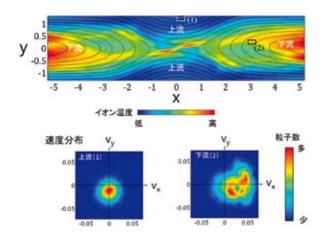


図2 磁気再結合におけるイオン加熱の粒子シミュレーション結果。上段は、磁力線(黒線)とイオン温度(カラーマップ)を示していて、磁力線はこの面のほぼ中心でつなぎ変わっています。下段は、磁気再結合点の上流の微小領域(1)と下流の微小領域(2)におけるイオン粒子の速度分布です。下流では円環状の速度分布が形成されていて、上流に比べて分布が広がっており、イオンが実効的に加熱されています。

ーマップ)を示します。面のほぼ中心で磁力線が つなぎ変わっており、その磁気再結合点の下流で イオン温度が高くなっていることが分かります。 また、上流の微小領域(1)と下流の微小領域(2) の粒子の速度分布を下段に示しました。上流の速 度分布は同心円のような形状(Maxwell分布)を しており、分布の中心付近に多くのイオンが存在 します。この中心位置のv,方向の大きさがプラズ マが磁気再結合点へ流れ込む平均的な速度に相当 します。一方、下流の速度分布は、円環状の構造 が形成されています。円の中心は、磁気再結合点 から流れ出してくるプラズマの速度に、円の半径 は、イオンがトロイダル磁場の回りを旋回する速 さに相当します。下流の速度分布は、上流に比べ て広がっていることから、イオンが実効的に加熱 されて温度が上昇していることが分かりました。 また、電場の空間分布を調べたところ、磁気再結 合が起こると下流側に強い電場が発生することを 示しました。そして、イオンの運動とこの電場の 関係を解析した結果、イオンは電場からエネルギ ーを獲得して大きな速さで旋回運動をするととも に、その旋回の中心がx方向に移動していくこと を明らかにしました。

次に、ポロイダル磁場、トロイダル磁場の強さ

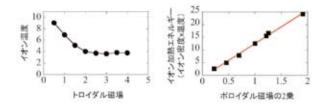


図3 イオン加熱の磁場依存性。左はトロイダル磁場、右はポロイ ダル磁場依存性を示します。イオン温度、密度は初期の値(磁 気再結合が起こる前の値)を1とした相対的な値です。

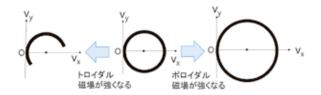


図4 磁気再結合点の下流領域におけるイオン粒子の速度分布の 模式図。円環状の分布(中)は、トロイダル磁場が強くな ると円の一部が欠けていき(左)、ポロイダル磁場が強く なると円の半径が大きくなります(右)。

を様々に変えてシミュレーションを行いました。 図3は、磁気再結合点の下流でのイオン温度に関 する結果です。左はトロイダル磁場が強くなると、 イオン温度が低くなる傾向があることを示してい ます。この性質は、TS-6の実験結果とよく一致し ます。一方、右は、イオン加熱エネルギーがポロ イダル磁場の2乗に比例して大きくなることを示 しています。この結果は、TS-6だけにとどまらず、 世界中のST装置で観測されている傾向です。この ことから、本シミュレーションの信頼性を確認す ることができました。また、磁気再結合点下流で のイオン粒子の速度分布について、磁場依存性を 調べました。図4に示したように、円環状の構造 をしていた速度分布が、トロイダル磁場が強くな ると円の一部が欠けていくことを発見しました。 また、ポロイダル磁場が強くなると、円環の半径 が大きくなることが分かりました。

今後は、STのプラズマ全体を計算できるように、シミュレーションモデルを拡張し、実験との比較研究を発展させていく予定です。そして、磁気再結合についての理解を深めることで、核融合研究のみならず、太陽フレアやオーロラの発生機構探求など、宇宙プラズマの研究にも貢献していきます。

(基礎物理シミュレーション研究系 准教授)

TOPICS

核融合科学研究所創立30周年記念市民学術講演会を開催しました

核融合科学研究所は、7月15日(月・祝)にバロー文化ホール(岐阜県多治見市)において、研究所創立30周年記念事業として市民学術講演会を開催し、多治見市、土岐市、瑞浪市を中心に約660名の方にご参加いただきました。

はじめに竹入所長から、「研究所は平成元年5月29日に発足してから、本年5月に節目の30周年を迎えました。本研究所に併設されている総合研究大学院大学の核融合科学専攻は、講師としてお招きした矢野創助教が所属している JAXA宇宙科学研究所を拠点とする宇宙科学専攻と同じ物理科学研究科に属し、日頃より協力して教育活動を行っています。また、講演に登場する「はやぶさ2」に搭載されているイオンエンジンは、マイクロ波加熱によりプラズマを生成し、ビーム技術によってエンジンを駆動しており、核融合研究と密接な関連があります。」との挨拶がありました。

続いて矢野助教から、「イトカワとリュウグウー新旧はやぶさ探査機が見た小惑星の姿ー」と題した講演があり、太陽系の天体についての紹介から始まり、「なぜ小惑星探査をするのか」、「太陽系の起源を調べるにはどうしたらいいのか」について、味噌ラーメンの作り方に例えた説明がありました。また、「はやぶさ」が到達したイトカワ、そして今回「はやぶさ2」が着陸に成功したリュウグウについても、着陸数秒前からの連続写真に基づく観測成果の紹介がありました。



矢野創 JAXA 宇宙科学研究所助教の講演

市民説明会を開催しました

核融合科学研究所は、土岐市(6月26日~7月12日)、多治見市(7月16日~7月31日)及び瑞浪市(8月6日)において、「核融合研究の進展と大型へリカル装置(LHD)の研究成果」について、市民説明会を開催しました。

説明会には土岐市7会場で140名、多治見市15会場で108名、瑞 浪市1会場で11名の方にご参加をいただき、LHDを用いたプラズマ 研究の内容と、2017年3月から開始した重水素ガスを用いた実験(重 水素実験)第2年次の実施結果、本年10月上旬から開始予定の重水 素実験第3年次の準備状況及び安全管理や情報公開の体制等につい て、研究所から説明を行いました。

説明会では地震に対する備えに関する質問のほか、「核融合発電が 実現するまでのスケジュールはどうなっていますか?」など、核融合 研究の今後について期待を寄せる質問も多くいただきました。



下石公民館で説明を行う竹入所長



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

2019年8,9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。