

NIFS NEWS

ISSN 1884-1600



No.228



2016 FEB/MAR

>>> 研究最前線・・・2-3

省エネでプラズマを加熱する
ー 電子サイクロトロン共鳴加熱の入射最適化 ー

辻村 亨

>>> 特 集・・・4

平成27年度総合研究大学院大学アジア冬の学校 (AWS2015)

石黒静児

>>> 会 議 報 告・・・5

第8回日中韓フォーサイト事業ワークショップ
第10回アジアプラズマ・核融合学会

磯部光孝
大石鉄太郎

>>> 退 職 者 記 事・・・6-7

ヘリオトロン研究への想い
これまでを振り返って

武藤 敬
山田修一

>>> トピックス・・・8

職場体験学習を受け入れました
Fusion フェスタ in Tokyo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

省エネでプラズマを加熱する — 電子サイクロトロン共鳴加熱の入射最適化 —

辻 村 亨

核融合科学研究所の大型ヘリカル装置（LHD）には電子サイクロトロン共鳴加熱（ECH）と呼ばれるプラズマ加熱装置があります。限られた加熱パワーの中で無駄無く効率良くプラズマを加熱するために、理論的に最適な加熱条件を放電ごとに計算するプログラムの開発と実験への適用を行っています。LHD の ECH では、波長がミリメートル帯の電磁波であるミリ波を用います。ミリ波の入射方向、及び電場の振動の方向（偏波）の2つを適切な条件にしてプラズマへ入射する必要があります。ここでは、偏波の向きは入射方向に垂直な面内においてトロイダル方向に対する回転角度をほぼ表します。それら2つの設定が適切でない場合、ミリ波のパワーの一部分はプラズマに吸収されず、プラズマを透過してしまいます。我々の扱うミリ波のパワーは1000キロワットのレベルで、かつ将来の核融合炉では更に大きくなる見込みです。ちなみにご家庭で使われる電子レンジの電磁波のパワーは1キロワットのレベルです。従って、プラズマに吸収されなかったミリ波はプラズマを十分に加熱しないだけでなく、炉内の機器にダメージを与える可能性もあります。ミリ波の入

射方向と振動方向を適切に設定するためには、ターゲットであるプラズマ中の磁場の大きさや方向、そしてプラズマの電子温度や密度の情報が必要になります。光が空気から水に斜めに入射すると進行方向が変わる（屈折）現象と同様に、プラズマ中でもミリ波は屈折し進行方向が変わります。また、ミリ波の振動方向がプラズマ中の磁場の方向に対して適切な関係にないと共鳴加熱条件から外れ、プラズマを十分に加熱することはできません。最近それらの計算に必要な情報が放電ごとに取得できるようになり、次の放電に向けて、最適な加熱条件を即座に計算できるようになってきています。図1にミリ波の入射方向を最適化計算する前とした後のプラズマ中でのビーム軌道を示します。「改善前」では、屈折の効果でミリ波がプラズマ中で曲がってしまい、プラズマ中の共鳴層と呼ばれるミリ波パワーが吸収されるエリアに進入できなかったために、ミリ波は吸収されずプラズマを素通りしてしまいました。それに対して、「改善後」では、屈折効果やプラズマの中心位置の情報などを考慮して、ミリ波の入射方向を調整することで、結果的にプラズマ中に吸収されるようになりました。

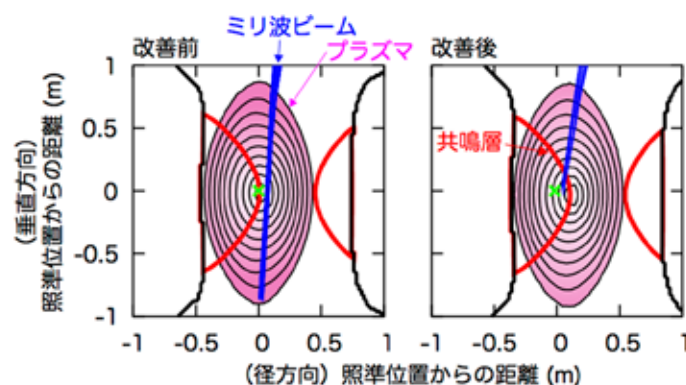


図1：入射方向の改善前後におけるミリ波ビームのLHD プラズマ中での軌道。
図中のバツ印は照準位置を表します。

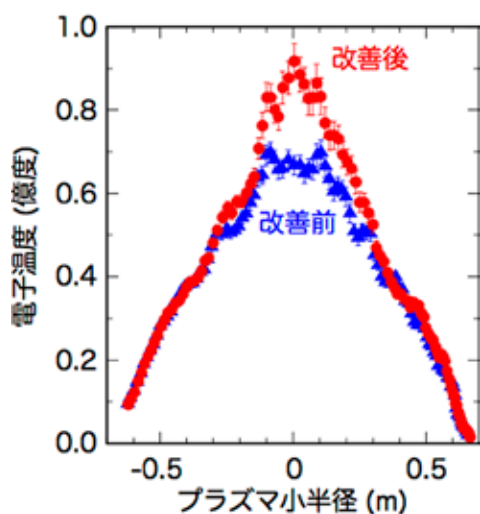


図2：入射方向の改善前後における電子温度分布

図2に改善前後における電子温度分布を示します。「改善後」にてミリ波パワーがプラズマのほぼ中心に吸収されたことで、プラズマ中心の電子温度が約2千万度増加していることが分かります。また、図1に示す上側からの入射（垂直方向）だけでなく、横側からの入射（水平方向）のECHに対しても同様に入射方向を調整することで中心加熱性能の向上に寄与し、電子温度の増加を後押ししています。

一方、ミリ波の偏波に関しては、放電中にリアルタイムで最適設定することを目指して、これまでに、ミリ波の振動方向を放電中にスキャンする実験を行い、実験結果と計算結果を比較しました。

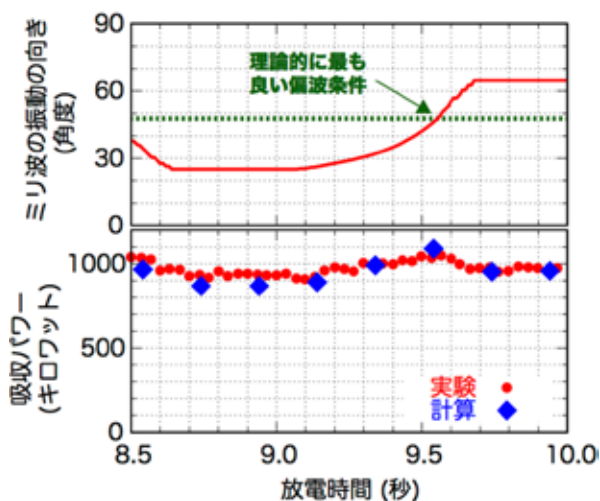


図3：プラズマに吸収されるミリ波パワーの入射偏波依存性。
ミリ波の振動方向を放電中に高速変化させました。

図3にプラズマに吸収されるミリ波パワーの入射偏波依存性を示します。ミリ波の振動方向の時間的变化に伴い、吸収パワーも増減していることが分かります。そして実験結果と計算結果が良い一致を示しており、理論的に最も良い偏波条件（プラズマを加熱する波動が最も励起される条件）と予測される約45度のときに、吸収パワーが最大値を示しています。吸収されなかったミリ波パワーの一部は真空容器内で多重反射（乱反射）を繰り返し、最終的にはプラズマに吸収されます。それでも吸収されなかった成分は真空容器内に充満します。省エネルギーの観点から言えば多重反射後に吸収された成分は結果的には良いように見えますが、狙った位置を精度良く加熱できていないという観点では良くありません。従って、ミリ波の入射方向と振動方向を適切に設定して、ミリ波パワーが単一パスで狙った位置に100%吸収されるのが理想です。

ところで、図3に示す計算結果は実験結果と良い一致を示していますが、この計算結果はプラズマと真空との境界の扱い方に大きく影響されます。図1に示すように閉じた磁気面の中にのみプラズマが存在し、その外に存在しないならば、境界ははっきりしています。しかし、実際の実験では閉じた磁気面の外側にも低密度のプラズマが存在しているので、ミリ波入射の最適化にはこの影響を考慮する必要があります。特にLHDにおいては、その領域において磁場の方向が変化しやすい特性を持っており、その領域の取り扱いが入射するミリ波の振動方向の最適設定において重要な役割を果たします。今回の計算では、閉じた磁気面を更に外へ仮想的に拡張させるモデルを使用し、プラズマと真空との境界をなくし、電子密度の大きさが外へ向かって小さくなる分布を用いています。この放電については実験値との良い一致が見られました。今後は閉じた磁気面より外のプラズマをより厳密に扱うモデルに発展させて、ミリ波の加熱効果を比較していく予定です。

将来の核融合炉においてECHは主要な加熱源となる見込みです。長時間の定常運転において、リアルタイムECH入射最適化による加熱機器の効率的な運用を行っていきたいと考えています。

（プラズマ加熱物理研究系 助教）

平成 27 年度総合研究大学院大学アジア冬の学校 (AWS2015)

石 黒 静 児

核融合科学研究所 (NIFS) に併設されている総合研究大学院大学 (総研大) 核融合科学専攻による総研大アジア冬の学校が平成 27 年 12 月 1 日から 4 日まで NIFS と分子科学研究所 (岡崎市) で開催されました。今回は、分子科学研究所に併設されている構造分子科学専攻及び機能分子科学専攻との合同開催となり、中国、台湾、インドネシア、マレーシア、ネパール、タイ、ベトナムの 7 の国と地域から 18 名、国内からは 12 名の合計 30 名のプラズマ・核融合及び分子科学に関心を持つ学生や若手研究者が参加しました。その内訳は学部生 6 名、大学院生 22 名、若手研究者 2 名となっています。

核融合研究入門、プラズマ分光、プラズマ粒子シミュレーション、磁場閉じ込めプラズマの理論、プラズマ壁相互作用に関するシミュレーションなどプラズマ・核融合に関する講義及び分子構造、電池など分子・材料科学に関する講義が行われました。これらの講義に加えて、大型ヘリカル装置 (LHD)

の見学、バーチャルリアリティ (VR) の体験実習及び分子科学研究所の極端紫外光研究施設の見学、さらには参加者及び NIFS で活動している学生や研究者によるポスター発表が行われ、活発な議論・交流が見られました。

この総研大アジア冬の学校は総研大物理科学研究科の 5 専攻の教育・研究活動を国内外の学生や若手研究者に広く紹介するために、平成 16 年度より毎年冬に開催されています。今年度は、「世界を眺める新しい目」を 5 専攻共通テーマ、「未来のエネルギーへの複合的アプローチ」を核融合科学専攻、構造分子科学専攻、機能分子科学専攻のサブテーマとして開催されました。

(基礎物理シミュレーション研究系 研究主幹・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



LHD 制御室見学



ポスター発表風景



参加者の集合写真

第8回日中韓フォーサイト事業ワークショップ 磯部 光孝

核融合科学研究所は、日本学術振興会・日中韓フォーサイト事業において採択されている研究交流課題「高性能プラズマの定常保持に必要な物理基盤の形成」に基づき、LHD（日本）、EAST（中国）及びKSTAR（韓国）間の国際共同研究を推進しています。本事業支援の下、共同研究の実施状況を報告し、具体的な研究計画を議論するためのワークショップを日中韓の持ち回りで年2回のペースで開催しています。核融合科学研究所主催による第8回会合が2015年12月1日から12月4日にかけて静岡県御殿場市にて開催され、3ヶ国から46名（内訳：日本19名、中国13名、韓国14名）が参加しました。本会合では、竹入康彦核融合科学研究所長、万宝年中国科学院等離子体物理研究所長により、今後の協力方針について確認がなされました。個々の研究課題については、以下の4つのカテゴリ、Ⅰ：「閉じ込め配位の定常保持」、Ⅱ：「周辺及びダイバー

タプラズマ制御」、Ⅲ：「高エネルギー粒子とバルクプラズマの相互作用」、そして課題を横断的に取り扱うⅣ：「理論・シミュレーション」に分けて行われ、活発な議論が交わされました。本事業では、若手教育も共同研究の重要な柱として位置付けられており、3ヶ国から大学院生の発表も多数行われました。次回は、2016年5月に中国・銀川市にて開催される予定です。

（高温プラズマ物理研究系 教授）



ワークショップ参加者の集合写真

第10回アジアプラズマ・核融合学会 大石 鉄太郎

2015年12月14日から18日にかけて、第10回アジアプラズマ・核融合学会（APFA）がインド北西部グジャラート州の州都ガンディーナガルで開催されました。APFAはアジアでのプラズマ・核融合研究を促進し交流を深めることを目的として日中韓及びインドの4国が交代で主催し、隔年で開催されます。本会議では269件の発表が行われました。核融合科学研究所からは7名が参加し、3件の招待講演、と4件の口頭発表及び、1件のポスター発表を行いました。森崎友宏大型ヘリカル装置計画（LHD）研究総主幹は、核融合原型炉の実現を目指して日本国内で行われている設計活動について、2件の招待講演を行いました。会場からは多数の質問が寄せられ活発な議論が行われました。森田繁教授は、日中韓3ヶ国の相互交流による研究ネットワークの形成を目指す「日中韓フォーサイト事業」の進展について招待講演を行いました。筆者は、LHDプラズマの

周辺部において不純物イオンが空間的に非対称な分布を持つ現象について、分光計測の結果を中心に口頭発表を行いました。その他、インドのADITYAとSST-1、韓国のKSTARといったアジアにおけるトカマク型装置における研究成果発表や、フランスで建設中の国際熱核融合実験炉ITERに対するアジア諸国の貢献についての発表が数多く行われました。次回は2017年に岐阜県土岐市で開催される予定です。

（高密度プラズマ物理研究系 助教）



森崎友宏大型ヘリカル装置計画研究総主幹による招待講演

ヘリオトロン研究への想い

武 藤 敬



私が京都大学工学部に入った頃にヘリカルヘリオトロン磁場のアイデアが発表されている。当時は大学紛争の最中であり、入学から半年は講義が無く、吉田構内のバリケードの中で全共闘学生の演説を聞か、下宿で本を読んで過ごす毎日であった。3回生になった頃、宇治構内にヘリオトロンD装置が建設された。大きな装置で面白い研究をしているとの噂を聞き、卒業研究に行くことにした。施設長はまだ40代半ばの宇尾光治先生で、独自発明のアイデアであるヘリカルヘリオトロンを実験しようとして、反対するグループと激しく論争した後であった。宇尾先生は反対する研究者達を学外へ放出する一方で、優秀なスタッフを集められていた。研究姿勢には反発も強かったのだが、豊かな国際経験と著名なバイオ研究者であった夫人の影響もあり、広い分野の豊富な話題を混えながら強い信念で夢に満ちた話をされる先生には不思議な説得力があった。優れた能力とアイデアがヘリカルヘリオトロン磁場の発明に繋がったのは勿論であるが、人を惹きつけ信じさせる能力と強い信念がヘリオトロン磁場を世に出し、核融合コミュニティの中では異端ともいえる磁場配位で大型装置を作る予算を獲得したと私は思っていた。

私は博士課程からアルフベン波を用いたプラズマ加熱をヘリオトロンDで行ったが、これが私の高周波加熱研究の始まりだった。その頃、イオンサイクロトロン共鳴加熱(ICH)は佐藤元泰先生が実験しておられた。両者ともIAEA会議に結果が発表される成果も出したが、時々真空のトラブルも起こした。私は学生時代から加熱実験を行い、そして真空トラブルとも縁が深い。

助手として採用され、ヘリオトロンEの準備に加わった。飯吉厚夫先生と本島修先生が建設と実験を主導しておられ、私はデータ処理とICHを担当することになった。当時は珍しいコンピュータによるデータ処理とデータ出力の実務に多くの時間と労力を費やした。研究としては実験データをコンピュータに大量に集め、実験スケーリングを出したのが記念である。トカマクのようにオーミック加熱をヘリオトロンで行うと、エネルギー閉じ込めが極端に悪化するのが結論で、LHDではオーミック加熱を採用しない根拠にもなっている。また、ヘリオトロンの磁場配位に対して、どんなICHアンテナが良いかをヘリオトロン

DR装置の基礎実験を通して検討し、ヘリオトロンEに装着した。このアンテナ設計は今のLHDのICHアンテナの元になっている。ヘリオトロンEのICH加熱では当時ヘリカル系の最高イオン温度であった1800万度を達成し、またICH単独でのプラズマ維持に成功したが、これはLHDの定常実験に繋がったと思う。

その後、核融合科学研究所の創設準備室に加わったので、20年間滞在した京都の宇治から名古屋と土岐へ異動し現在に至っている。あれから28年間になり京都時代をはるかに超えた。殆どはICHとECHを用いた定常実験とイオン加熱に関わり、楽しく研究することができた。そしてヘリオトロン配位の弱点と批判されていた高エネルギーイオンの粒子損失の影響が小さいことの実証や、特長である定常運転の実証に中心的に関わることができた。これは優秀な若手が周囲に居て共に実験できたお陰だと思っている。学生時代からと同じく真空の問題に悩まされたが、これも核融合炉では最後まで最大の課題となるであろう事との出会いとも思える。LHDについては殆ど書く余裕が無くなってしまったのでまた別の機会を探したいと思う。

LHD研究は長く続けられているが、ヘリオトロン以外の方式は将来が見えない。次のステップを目指す訳だが、誰かがコミュニティと社会を説得する魅力を示し、強力で若者を率いてプロジェクトを進めなければならない。再びヘリオトロン研究がスタートした時のような活発な時代が来ることを信じている。

(プラズマ加熱物理研究系 研究主幹・教授)



第2サイクル(平成10年)前にLHDに設置したアンテナと共に

これまでを振り返って

山 田 修 一



退職を前にこれまでを振り返ると、いろいろなことが頭の中をよぎります。年を取ったせいか、最近の事より若かった頃の事の方が、くつきりと思い出されます。今日退職するまで四十余年の間、転職せずにこられたのは、仕事の内容が自分にあっていたこと、職場の居心地が良かったこと、等につきるからだと思っています。

最初に仕事に就いたのが名古屋大学プラズマ研究所の高ベータグループ（（故）平野恵一先生がリーダー）で、主に電源構成機器の設計・建設・運転などを担当していました。論文に繋がる初めての仕事は、超高速動作の投入スイッチの研究開発でした。大電流化・高速度化及び接点のチャタリングの除去に悩まされましたが、完成させることができました。グループの解散に伴い、共通コンデンサーバンク（約7MJ）をお世話することになり、同バンクを利用する研究、200T/s パルス超電導マグネットの開発研究、並びに逆転磁界ピンチ（RFP）プラズマの研究に従事することになりました。前者の共同研究では、中規模トカマク装置のポロイダルコイルを模擬した通電波形を発生させるのが私の役目でした。開発目標の200 T/s（コイル内の最大点で300 T/s以上）を達成し、その時の交流損失は蓄積磁気エネルギーの0.3 % 程度でした。これまでの磁場変化率11 T/sに比べ1桁以上大きな領域での実証でした。一方、後者のRFPプラズマ実験装置STP-3(M)の設計・建設は、僅か3名での立上げとなりました。私の担当は、装置設計及び電源設計でした。装置及び電源設計をするためには、RFPプラズマの特性を理解することが必要で、この頃、Shafranovの平衡理論を真剣に勉強したことが懐かしく思い出されます。二重導体シェルと準定常垂直磁界によるプラズマ平衡の実証は、STP-3(M)装置の数ある成果の一つです。

改組統合で核融合科学研究所に異動してからは、本島修先生及び（故）山本純也先生の下で、LHDの設計・建設に携わることになりました。低温実験棟及び各種R&Dの立上げのために、私たち（6名）が最初に土岐キャンパスへ移住しました。ヘリカル用とポロイダルコイル用の超伝導導体の開発、モデルコイルによるコイル巻線技術の実証、長さ10mの超伝導バスラインによる冷却通電試験（最大40kAの通電）等です。名古屋大学キャンパスで

開催される設計会議（LOB）への出席のため、1日で100km以上移動する日もありました。LHDでは超伝導バスラインを担当しました。超伝導ケーブルを真直ぐ伸ばして多重管に引き込む作業、ケーブルドラムに巻き取る作業は、120 m以上の直線が必要で、工場内の他の場所が使用可能な土日の作業となりました。工場が千葉縣市原市に位置し、移動の際には京葉線の舞浜（東京ディズニーランド）を羨望のまなざしで見ながらの週末の工場立会でした（20回程度）。超伝導送電システムに対しては、LHDプラズマ実験前と実験後の点検等をしっかり行ってきたので、今日迄の17年間、大きなトラブルがありませんでした（電源軽故障1Sによる停止が1回のみ）。担当者としては自負できることです。今後もこの記録が継続されることを切に願っております。

国際交流は、核融合研での研究生活の中でエフォートの割合が逐次増加してきました。一つは日中拠点大学（CUP）と政府間協定による日中交流事業（JWG）で、もう一つはITERへの協力です。CUPでは後半の5年間、サブコーディネータとして事業を運営させていただきました。また、JWGでは2008年のキックオフから今年までの9年間、サブコーディネータとして事業を進めさせていただきました。両事業をあわせると50名以上の研究者の受け入れを実施しました。ITERにおいては、外部専門家として、電源の概念設計評価会合、フィーダーの概念設計評価会合、寒冷分配の予備設計評価会合等に招聘され、フィーダーに関しては20件以上の設計書類に対してレビューを行ってきました。これらは全てボランティア活動です。

最後になりましたが、名古屋大学プラズマ研究所と核融合科学研究所でお世話になりました多くの方々に感謝し、深くお礼を申し上げます。これからは核融合科学研究所の発展と皆様のご活躍を祈念いたします。

（装置工学・応用物理研究系 准教授）

TOPICS

トピックス

職場体験学習を受け入れました

核融合研究所では、近隣の中学校・高校が行う職場体験学習に協力しています。2月2日から4日に岐阜県立土岐商業高等学校から8名の生徒が来所し、技術部と管理部に分かれて様々な職場体験をしました。

技術部では、実験装置を遠隔で操作する機器の設置などを体験しました。また管理部では、旅費などの計算や伝票の確認作業、図書館業務、広報活動などを体験しました。こうした職場体験を通じて、研究所には研究以外にもいろいろな仕事があり、それらに多くの人が関わっていることを実感してもらうことができました。



Fusion フェスタ in Tokyoのご案内

未来エネルギーとして期待されている核融合の研究を紹介する『Fusion フェスタ in Tokyo』が、日本科学未来館において平成28年4月30日(土)に開催されます。講演のほか、ご家族で楽しめる科学工作体験、科学教室もあります。皆様のお越しをお待ちしております。

開催日時：平成28年4月30日(土) 10:00～17:00 (最終入場 16:30)

会場：日本科学未来館(東京都江東区青海2-3-6) 入場無料

特別講演：『アインシュタインの相対性理論と宇宙の誕生』

日本学術振興会学術システム研究センター長・前自然科学研究機構長・東京大学名誉教授
佐藤 勝彦先生

【お問い合わせ先】

自然科学研究機構 核融合科学研究所 管理部研究支援課

〒509-5292 岐阜県土岐市下石町322-6 TEL: 0572-58-2040

URL: <http://www.nifs.ac.jp/welcome/tokyo2016/>

昨年の Fusion フェスタ in Tokyoの様子



竹入所長講演



真空実験



磁気浮上列車



ビンゴ大会



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.228

2016年2,3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権を複写したい方は(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 著作権の転載・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。