ISSN 1884-1600

NIFS NEWS

NIFS

No.244









核融合科学研究所オープンキャンパス 2018 を開催

2018 OCT/NOV

>>> 特

集 ・・・・ 2-4

森﨑友宏

第20サイクルのプラズマ実験開始にあたって 核融合科学研究所オープンキャンパス2018

「体感!体験!プラズマエネルギー」

高畑一也

>>> 研究最前線 **** 5-6

電子の集団運動から電磁波の発生、そしてプラズマの電子を加熱する 一大電力ミリ波発振管ジャイロトロンによるプラズマの加熱一

下妻 隆

>>> 会議報告・・・・ 7

第30回核融合技術シンポジウム (SOFT2018)

小林 真

>>> トピックス・・・・ 8

平成30年度防災訓練を実施

黄 中国科学技術部副部長が核融合科学研究所を表敬訪問

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

第20サイクルのプラズマ実験開始にあたって

森崎友宏

10月23日、平成最後となる大型へリカル装置 (LHD) の「第20サイクルのプラズマ実験」が始 まりました。「サイクル」とは、数か月間連続し てプラズマ実験を行う期間のことで、今回は、平 成10年の実験開始から数えて、20回目の実験期 間ということになります。この間LHDは、数々の 世界記録を樹立するとともに、プラズマ物理学上 極めて重要な発見等、多くの成果を上げてきまし た。そして前回の第19サイクル実験からは、重水 素*を用いてプラズマの更なる高性能化を目指す 「重水素実験」に移行しました。ヘリカル装置に おける本格的な重水素実験はLHDが初めてとなる ことから、世界中の核融合研究者が注目していま す。実はこの原稿を、私は出張先のインド・アー メダバード市で書いています。というのも初めて の重水素実験の結果を、同地で開催中の核融合研 究に関する世界最大の国際会議「IAEA核融合エネ ルギー会議」で発表するためです。研究所からは 私のほかに35名が出席しており、1週間にわたっ て世界中から集まった約800名の研究者の間で活 発な議論が交わされています。LHDからの発表は どれも高い関心と評価を得ており、今後の重水素 実験の展開に期待する声が数多く聴かれました。

第20サイクルのプラズマ実験でも重水素を用い た実験を継続します。プラズマ性能の更なる高性 能化を目指すとともに、IAEA会議における議論の 内容もフィードバックさせつつ、より学術的な研 究も深化させます。前サイクルでは、ガスを軽水 素**から重水素に切り替えた数ヶ月後に、イオン 温度が核融合条件の一つである1億2,000万度を 達成しました。この時の電子温度は4,000万度程 度に留まっていましたが、今回の実験では、電子 温度も上げてイオン温度に近い値を持つプラズマ の生成を目指します。イオンと電子から成るプラ ズマは、一つの物質でありながらこのように二つ の温度を持つことがしばしばあります。ところが、 将来の核融合炉内のプラズマは、イオン温度と電 子温度がほぼ同じ値になると考えられています。 超高温の核融合プラズマがどのような振る舞いを するのか、この問いに答えるためには、電子もで きるだけ高い温度にする必要があります。一方、

重水素実験で高いイオン温度が達成された要因の 一つとして、重水素プラズマの方が、軽水素プラ ズマより熱が伝わりにくい(従ってプラズマが冷 えにくい)性質を持っているということが前回の 実験で明らかになりました。しかし、その理由は 分かっていません。これは「同位体効果」と呼ば れており、核融合研究における最大の謎の一つと されています。今回の実験では、この同位体効果 のメカニズムの解明や、プラズマを加熱する役割 を担う高エネルギー粒子の閉じ込めに関する研究 等にも取り組みます。

第20サイクルの実験期間は、10月23日から来年2月21日までを予定しています。その後、極低温(マイナス269℃)の超伝導コイルを室温に戻す操作が続きますので、装置が完全に停止するのは3月中旬頃となります。

毎日の実験予定や1週間ごとの実験結果をまとめた「週間レポート」、実験関係のホットな話題等はホームページの「LHD実験情報」に掲載していく予定です。また見学もこれまでどおり受け付けています。実験中は本体室には入室できませんが制御室の見学は可能です。是非、実験を行っている"現場"をご覧いただきたいと思っています。今後ともご支援、ご協力の程よろしくお願い申し上げます。

(大型ヘリカル装置計画研究総主幹/ 高密度プラズマ物理研究系 教授)

※ 重水素:通常の水素の2倍の質量を持つ水素。 化学的性質は通常の水素と同じ。

※※ 軽水素:通常の水素



第20サイクルのプラズマ実験の様子

核融合科学研究所オープンキャンパス2018 「体感!体験!プラズマエネルギー」

9月8日に、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 21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けます。また恒 例となっているペットボトルロケット、セラミッ ク折り紙、工作教室、マスコットキャラクターた ちとの交流は、子どもたちに大人気です。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、普段は見ることができないスーパ ーコンピュータも間近にご覧いただけます。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600名近い方が体験されました。

LHDの見学は、大型ヘリカル実験棟の本体室内等が管理区域に設定されているため、事前申込制となりました。申込制を始めた昨年より多い90名



他では見られないプラズマ展示「くるくるヘリカル」

高畑一也



マスコットキャラクターたちがお出迎え 手前から、うながっぱ、とっくりとっくん、プラズマくん、ヘリ カちゃん、ミナモ

を募集しましたが、予想より多くの方にお申込み をいただき抽選となりました。当選されなかった 皆さまも、是非来年のお申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



子どもたちに大人気のペットボトルロケット

NIFS NEWS

屋隼人助教による「自然エネルギーと核融合のお話」、伊神弘恵准教授による「波動パワーで温めるプラズマ」の2部構成の講演会を開催しました。 どちらも70名近い方に聴講いただき、講演の後も、盛んに質問が出ていました。

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。17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チームの中から見事にNIFS杯を獲得したのは、多治見市の小泉少年サッカークラブでした。

当日は天候が心配されましたが、雨に見舞われることもなく、約1,500名の方にご来場いただきました。アンケートでは、「工作が楽しかった」「説明が分かりやすかった」「研究所が身近に感じられた」といった嬉しいご意見をいただきました。皆さまからいただいたご意見を参考に、来年も更に内容の濃い、分かりやすい展示、公開を企画いたします。皆さまのお越しを心よりお待ちしています。

(装置工学・応用物理研究系 教授/オープンキャンパス2018実行委員長)



スーパーコンピュータを間近で見ることができました。





少年サッカー交流大会、開会式の様子

電子の集団運動から電磁波の発生、そしてプラズマの電子を加熱する 一大電力ミリ波発振管ジャイロトロンによるプラズマの加熱—

下 妻 隆

熱核融合反応により核融合炉を実現するためには、プラズマを数億度という超高温に加熱することが要求されます。プラズマは、イオンと電子がバラバラになった状態のことですが、電子を電磁波によって高温度まで加熱する手法の一つが「電子サイクロトロン共鳴加熱」です。強力な磁場によって容器の中に閉じ込められたプラズマ中の電子の旋回運動に共鳴するような周波数の電磁波を入射し、電子を加熱します。ここでは、この加熱法の特徴とそれに必要とされる技術、装置について説明します。

核融合科学研究所(NIFS)の大型ヘリカル装置 (LHD) では、超伝導コイルによって発生した磁 場により、プラズマを閉じ込めています。そのよ うな磁場中では、プラズマを構成している電荷を 持ったイオンや電子は、磁力線に巻きつくように 旋回運動をしています。特に電子については、お よそ1秒間に770億回の円形の旋回運動をしてい ます。この旋回運動に共鳴するような電磁波、す なわち周波数が約77ギガヘルツ(ギガは10億)、 またはその2倍の154ギガヘルツの電磁波を入射 すると、これによって電子が加速され、電子の運 動エネルギーが増加し、さらにプラズマ中のイオ ンとの衝突によってプラズマ全体が加熱されます。 この現象は電子サイクロトロン共鳴加熱(ECRH) と呼ばれ、核融合炉でのプラズマの加熱手法 の一つとして有望視されています。さらに ECRHでは、電子の加熱だけではなく、核融 合装置において、プラズマを生成したり、電 流を駆動したりすることもできます。

このような高い周波数で、大きなパワーを 持った電磁波を発生させるにはどのようにすればよいでしょうか? これは、上で述べた 方法の逆の過程、すなわち電子の旋回運動から電磁波を発生させればよいのです。電子を 集団的に加速させることで、強力な電磁波を 得ることができます。これを実現するには、 共振器(キャビティ)というものを利用します。形は違いますが、ちょうど音叉の下についている共鳴箱のような役割をするものです。周波数が、数ギガヘルツから数百ギガヘルツ(電磁波の波長が数十センチメートルから数ミリメートル)で、大きなパワーの電磁波を発生させる発振器には、このような共振器と、電子ビームを発生する電子銃とを持つ大型の真空管、例えばマグネトロン、ジャイロトロンなどが用いられます。よく知られたマグネトロンは家庭用の電子レンジなどに、クライストロンはレーダーや通信、加速器などに使われています。出力は数キロワット級のものから、十万キロワット級まで発生できるものもあります。

ジャイロトロンは、さらに高い周波数百ギガへルツ帯まで大きなパワー(千キロワット以上)が発生できる発振管として、ロシアとアメリカで1964-1965年頃に考案され、開発、改良が進められて今日に至っています。核融合プラズマでの電子加熱のためのパワー源として、一本のジャイロトロンで1,000~2,000キロワット出力で、1,000秒くらいの準定常運転ができるものが開発されてきています。

NIFSで使われているジャイロトロン発振管の写真とその概略構造を図1に示します。全長は約3

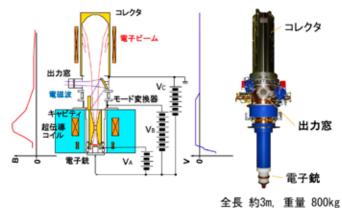


図1. 核融合用の大電力ジャイロトロン管の構造と写真。Bは管軸上での磁場強度分布を、Vは各部の電位分布を示す。

NIFS NEWS

メートル、重さはおよそ0.8トンの巨大な真空管です。ジャイロトロンは、非常に強い磁場を発生する超伝導磁石の中に挿入されています。高電圧(約8万ボルト)により電子銃から電子ビームが引き出され、らせん運動をしながら高速に加速されます。電子が得た運動エネルギーは、キャビティ(空洞共振器)で、一部がマイクロ波のエネルギーに変換されます。発生したマイクロ波は強度の分布をいくつかの集光鏡により成形され、最終的には、電波の損失が非常に少ない人工ダイヤモンド製の真空窓を通して外に取り出されます。

NIFSでは、LHDでの強力な電子加熱とプラズマの制御を行うことを目的として、LHDの建設当初の1994年頃よりジャイロトロンの開発を開始しました。実験開始当初は、LHDの最大磁場強度3テスラに共鳴する周波数に合わせて、84ギガヘルツと168ギガヘルツの2種類の周波数のジャイロトロンを開発し、使用していました。現状では、加熱領域の自由度を上げるために少し周波数を下げ、筑波大学との共同研究で周波数が77ギガヘルツ、154ギガヘルツの5台のジャイロトロンを設計、製作し、LHDでのプラズマ実験に使用しています。初期プラズマの生成やプラズマの電子加熱、プラズマ中での電磁波による電流駆動などの実験に使われています。ジャイロトロンと超伝導マグネットの全体システムの写真を図2に示します。

77ギガヘルツのジャイロトロンでは、最大出力 1,800キロワットで 1 秒、300キロワットで40 分の連続運転に成功し、発振効率としても、入力 電力の約40%を電磁波の出力として取り出すこと に成功しています。これらのジャイロトロンを用いて、プラズマ中心での電子温度約1億5,700万度を、電子密度10兆個/cm³で達成しています。

最近の動向としては、1本のジャイロトロン管で、超伝導磁石の磁場強度を変えることによって、強力なパワーでの発振が、複数の周波数で可能となるものが設計、開発されています。例えば、154ギガヘルツと116ギガヘルツの周波数を、磁場強度を変えることによって選択的に発振することができます。これを使うと、プラズマ実験において、高調波(基本共鳴周波数の2倍や3倍)を組み合わせ



図2. LHDの加熱実験用として設置されたジャイロトロンシステム

た加熱手法で、相互に加熱を強めあうことがあり、 プラズマの加熱の相乗効果が期待できます。

ジャイロトロン発振管は、非常に高い周波数帯において高出力で長時間運転ができる唯一の発振源です。また発振周波数もテラヘルツ帯(1兆ヘルツ、波長0.3ミリメートル)まで広がっています。その用途は、核融合分野にとどまらず、物性分野やバイオ・医療分野への応用、産業応用まで拡大しています。

図3は、ジャイロトロンの応用分野の拡がりを示しています。核融合分野でのプラズマ加熱やプラズマ計測への適用はもとより、産業分野では、セラミックや金属の焼結、通信手段として、またバイオや医療への適用など、その応用はますます広がっています。

(プラズマ加熱物理研究系 教授)

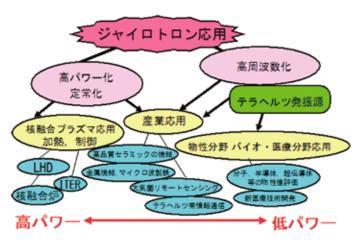


図3. ジャイロトロンの応用分野の拡大

第30回核融合技術シンポジウム(SOFT2018)

小 林 真

2018年9月16日から9月21日の期間において、第30回核融合技術シンポジウム(Symposium on Fusion Technology)がイタリア・シチリア島のジャルディーニョナクソス市で開催されました。本会議はヨーロッパ各国の持ち回りで隔年開催されており、最新の核融合工学研究や将来の大型核融合装置実験計画について、1,000名程度の参加者が議論を行う、活気のある会議です。今回の参加者は1,023名で、開催国のイタリアから約200名、ドイツから約180名、日本からは約80名の参加がありました。核融合科学研究所からは核融合工学研究プロジェクトメンバーを中心に12名が参加し、共同研究まで含めると計30件の発表を行いました。

会議初日にはジャルディーニョナクソス市に 隣接するタオルミーナ市のギリシア劇場にてオー プニングセッションが開催され、ITER機構のB. Bigot機構長からITER建設における調達状況やス ケジュール、調達機器の最終的な組立て時におけ るリスク管理などについての基調講演がありまし た。また、同市のオーケストラ楽団による演奏も 催されました。

会議においては、ヨーロッパ原型炉開発ロードマップ、欧州共同のトカマク実験装置JETで予定されているDT実験準備状況、ヘリカル装置W7-Xの実験結果のサマリー、核融合中性子源IFMIF-



オープニングセレモニーでのB. Bigot ITER機構長による基調講演

DONESやダイバータ試験用トカマク装置DTTなどの次期計画についての基調講演があり、ヨーロッパにおける核融合開発のアクティビティーの高さを感じました。筆者は、Deuterium retention behavior in tungsten irradiated with neutron under divertor operation temperatureと題し、日米科学技術協力事業協同プロジェクトであるPHENIX計画で進めるダイバータにおける燃料粒子蓄積についての研究発表を行い、海外の研究者と有益な意見交換をすることができました。また、当研究所からは、核融合システム研究系の後藤拓也助教がプラズマからの受熱性能の高い液体ダイバータの基礎研究に関する口頭発表を行い、高い関心を得ました。

次回は2020年にクロアチアのドゥブロブニク で開催されます。

(装置工学・応用物理研究系 助教)



SOFT会場の様子



後藤拓也助教の口頭発表の様子

TOPICS

平成30年度防災訓練を実施

核融合科学研究所は、9月19日に、土岐市南消防署の協力を得て防災訓練を 実施し、職員や学生など所員325名が参加しました。

訓練は、9時30分に震度6弱の大地震が発生し、研究所構内の食堂厨房で負傷者が発生し出火したという想定の下で、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。

統括管理者の指示により、研究所職員で構成される自衛消防隊は研究棟や管理・福利棟などアカデミックゾーンを担当する「本部隊」と、大型へリカル実験棟などの実験ゾーンを担当する「地区隊」に分かれて、地元自治体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、地震災害を想定した負傷者の搬出、初期



災害対策本部の様子



負傷者搬送訓練を行う自衛消防隊

消火などを行いました。隊員以外の所員は、研究所構内に指定された一次避難場所へ速やかに避難し、安否情報確認を行いました。警戒態勢の解除とともに防災訓練が終了し、引き続き、土岐市南消防署員の指導の下、所員による屋内消火栓と消火器の取扱い訓練が行われました。

今年度は、地元住民からの避難要請を想定した誘導訓練を行うなど、より実践的な訓練を行いました。土岐市南消防署からは、「安否確認が遅れる場合や避難放送が聞き取りづらい場合があるが、実際の災害現場でも起きうることであるため、想定の中に入れて訓練すべき。」との講評がありました。また、竹入所長からは、所員に対し「緊急事態への習熟度は上がってきている。これに満足せず、更に習熟していってほしい。」との挨拶がありました。

黄 中国科学技術部副部長 (副大臣) が核融合科学研究所を表敬訪問

中国科学技術部黄 衛 副部長(副大臣) ら8名が、10月30日に核融合科学研究所を表敬訪問しました。

一行は、竹入所長から研究概要の説明を受けるとともに、日中両国の核融合研究について意見交換を行いました。次いで、制御棟制御室、大型へリカル実験棟本体室を視察しました。本体室では、実際に大型へリカル装置(LHD)の上部から視察し、装置の大きさを体感するとともに、LHDの周辺に多く設置されている様々な機器の役割などの説明を受け、熱心に聞き入っていました。

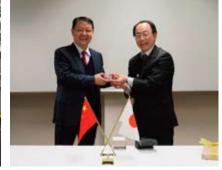
今回の表敬訪問を通じて、核融合研と中国西南交通大学間で昨年度から開始された、中国初のヘリカル研究に係る共同プロジェクトの推進など、今後の核融合研究における連携の重要性が確認されました。



制御室において説明を受ける黄副部長(中央)



中国科学技術部一行(黄副部長は後方中央)



黄副部長(左)と竹入所長



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

2018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。