

NIFS NEWS

ISSN 1884-1600



No.241

SOKENDAI
Department of FUSION SCIENCE

第15回 平成30年度 総合研究大学院大学・核融合科学専攻
核融合科学専攻 Summer Student Program

2018 MON 8.20 → FRI 8.24

夏の体験入学

参加者募集

世界最先端の研究を一緒に体験してみませんか。
核融合プラズマの特性・加熱・制御に関する基礎的・応用的研究、
スーパーコンピュータによるプラズマ・シミュレーション研究、
核融合炉設計・産業応用研究など、幅広い分野から課題を研究し、
合宿形式で研究の最前線を体験することができます。

エネルギー研究の最前線で未来を拓く。

対象者 大学1～4年生、高専4～5年生及び専攻科学生 募集定員 30名 抽選も選考あり

応募方法 詳しくは <http://soken.nifs.ac.jp/> をご覧ください。 応募締切 2018年 6月29日(金) 正午まで

総合研究大学院大学 核融合科学研究所

夏の体験入学開催

2018 APR/MAY

>>> 研究最前線・・・2-6

成果報告：大型ヘリカル装置計画研究プロジェクト

～20周年を迎えた大型ヘリカル装置実験～ 森崎 友宏

成果報告：数値実験炉研究プロジェクト

洲鎌 英雄

成果報告：核融合工学研究プロジェクト

室賀 健夫

>>> 会議報告・・・7

第2回LHD重水素実験国際ワークショップ

横山 雅之

>>> トピックス・・・8

平成29年度核融合科学研究所技術研究会を開催

最終講義が行われました

平成30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

成果報告：大型ヘリカル装置計画研究プロジェクト ～20周年を迎えた大型ヘリカル装置実験～

森 崎 友 宏

平成10年3月31日午後2時13分、白くか細いプラズマの映像が僅か0.1秒間だけ制御室のモニターに映りました（写真1）。大型ヘリカル装置（LHD）のプラズマが産声を上げた瞬間です。この時、制御室に集まった来賓や実験関係者から大きな拍手と歓声が上がりました。本当に一瞬の出来事でしたが、装置を作ってきた私たち実験関係者は、LHDの磁力線が生まれたばかりのプラズマをしっかりと包み込んでいることを確認し、安堵したのを覚えています。

記念すべきファーストプラズマの点火から遡ること8年、核融合科学研究所は核融合発電の実現を見通すことが可能なプラズマ実験を行うために、岐阜県土岐市において我が国独自のアイデアに基づく超伝導プラズマ実験装置・LHDの建設を開始しました。市街地から数キロメートルほど離れた丘陵地を造成した新キャンパスに、当時最先端の技術と多くの人材が投入され、LHDは平成9年12月に完成しました。実験開始後は毎年数多くの研究成果を挙げ、以降今日までの20年間、プラズマ物理・核融合研究の発展に貢献してきました。例えば平成25年度には、イオン温度9,400万度、連続運転48分などの記録を達成しています。これらの記録は、加熱電力（パワー）の増強を主とする装置の改良・最適化等に加えて、様々な学術研究の進展に支えられています。

百聞は一見に如かず、写真2をご覧ください。

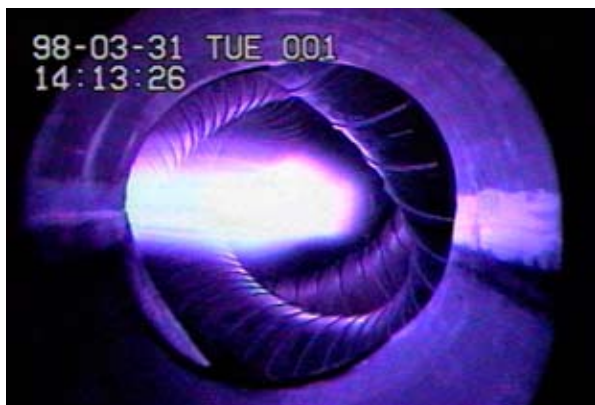


写真1 ファーストプラズマ（平成10年3月31日午後2時13分、水素プラズマ）



写真2 実験開始当時のLHD

これは実験開始直後の実験室の様子です。LHDの周りはすっきりしています。当時は計測器も必要最低限のものしか設置されていなかったため、ファーストプラズマの正確な温度は不明です。恐らく数10万～数100万度程度と推定されます。一方、写真3は最近撮影されたものですが、加熱装置や計測器が“所狭し”と設置されており、LHD本体が見えなくなるほどです。プラズマの挙動も手に取るように分かってきました。これにより不安定性の発生といったプラズマの高性能化を阻む原因を突き止めるとともに、それを回避・抑制するための方策として、例えば閉じ込め磁場の形状や加熱方法に工夫を施す等によりプラズマの性能を徐々に高めることに成功しました。図1は加熱パワーと電子温度、イオン温度（プラズマ性能）の変遷を示しています。加熱パワーの増加とプラズマ性能の向上は必ずしも連動しておらず、プラズマ性能にはしばしば停滞が見られるものの、科学的な解決策が施された後、上昇に転じていることが分かります。

このように、名実ともに世界のヘリカルプラズマ研究のフロントランナーとして走り続けてきたLHDですが、20歳の誕生日を迎える年（平成29年度）に大きな転機を迎えました。実験で用いるガスを、それまでの軽水素から重水素に変更することで、プラズマ性能を更に一段上に引き上げる計画です。各国の中・大型のトカマク装置が既に

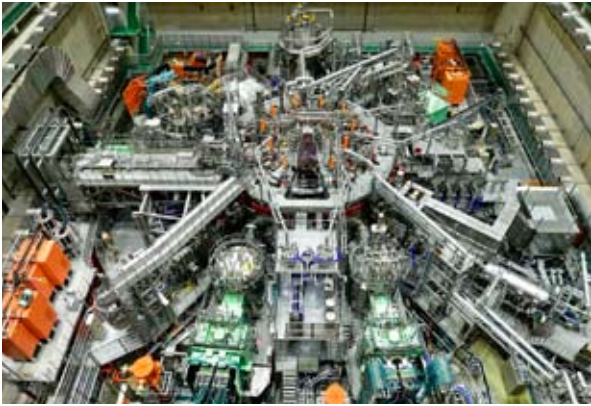


写真3 最近のLHD

重水素実験を進める中、20歳になったLHDもその仲間入りを果たしたわけです。そして期待通りにLHDは重水素実験開始早々、自身が軽水素実験時に打ち立てたイオン温度9,400万度を上回る、1億2,000万度を達成しました。これは核融合発電の実現に必要な三つの条件の一つであり、LHDがこの値を達成したことは、ヘリカル型核融合炉研究の大きな前進を意味します。平成29年度は、ヘリカル装置で初めて得られたこの1億2,000万度のプラズマの性質を調べる実験を集中的に行いました。私たちが一番気になることは、重水素プラズマ中の熱の伝わり方です。もっと端的に言うと重水素プラズマの“冷えやすさ”です。熱が伝わりやすく冷えやすいプラズマは、いくら加熱パワーを投入してもなかなか熱くなってくれません。LHDは世界最高性能を誇る温度計測器を備えています。これを使ってプラズマ中心から周辺部に至る詳細な温度分布を測定し、京都大学と共同で開発した解析プログラムを用いて、プラズマの熱輸送係数と呼ばれる冷えやすさの指標を導出したところ、予想通りプラズマの全領域にわたって、重水素プラズマの方が軽水素プラズマより冷えにくい性質を持っていることが分かりました。また、プラズマ粒子（イオン）の振る舞いも軽水素と重水素で異なることが観測されました。初年度だけでも新しい知見が数多く得られており、次回以降の実験も大いに期待されるところです。

LHDは、重水素実験によって核融合炉の条件に近い性能のプラズマを用いた研究を行うことが可能になりました。今後は高性能化した重水素プラズマを用いて、更なる課題に取り組んでいきます。例えば、イオン温度1億2,000万度を記録したプラズマの電子温度は4,100万度程度です。より核融合条件に近づくためには加熱方法や運転方法

の最適化を進め、電子温度もイオン温度に近い値まで高めていかなければなりません。また、プラズマ内で生成される高エネルギーイオンは、プラズマ全体を加熱する役割を担うことから、それが逃げないように閉じ込めておくことが肝要です。重水素実験で高エネルギーイオンの閉じ込め状態を直接計測することが可能となったことから、高エネルギーイオンの閉じ込め状態が明らかになるものと思われます。さらに「なぜ重水素プラズマは軽水素プラズマより性能がよいのか」といった根本的な問いに対する答えも未だに得られていないことから、その謎を解き明かすための学術的な面からの貢献もLHDに求められています。

高いレベルで研究を遂行するためには、多くの研究者間の情報共有と協力が欠かせません。そのため研究所は、LHDの研究成果を学術論文や国際会議の発表等を通じて広く世界に発信してきました。その結果、国内外から多くの注目を集め平成29年度末現在、29の大学や研究機関と国際学術交流協定を締結して共同研究を行っています。特に重水素実験開始後は海外からの関心が高まっており、LHD実験への参加者数は大幅に増加しました。今後更に共同研究を活性化させ、最先端の成果を東濃の地から世界に発信していきます。

(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)

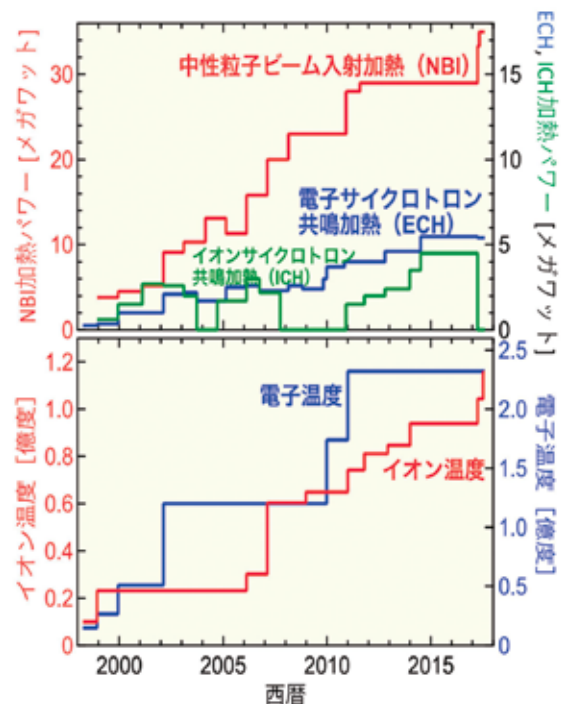


図1 加熱パワー（上）とプラズマ性能（下）の変遷

成果報告：数値実験炉研究プロジェクト

洲 鎌 英 雄

数値実験炉研究プロジェクトでは、大型ヘリカル装置(LHD)計画プロジェクトや核融合工学研究プロジェクトと連携しながら、超高温プラズマで起こる様々な物理現象の理解を深め、それらを予測し、将来の核融合発電炉の設計に役立てるため、先端的な理論モデルとスーパーコンピュータを駆使した大規模なシミュレーション研究を行っています。以下では、最近の研究成果を2件ご紹介します。

LHDの実験では、プラズマの巨視的な流れが精力的に計測されています。この場合、楕円形をしたプラズマ断面において横長直線方向の一次元的な流れの速度が計測されます。したがって、これ以外の領域での巨視的な流れは、直接得ることはできません。そこで本研究では、電磁流体力学とよばれる理論モデルに基づいて、この計測データに対応する平衡の数値シミュレーションを行い、プラズマ中のすべての領域でのプラズマの速度を再現する手法を新たに確立しました。その結果、一次元的に得られていた計測データから、図1に示すような三次元分布が得られるようになりました。このようなプラズマの巨視的な流れは、プラ

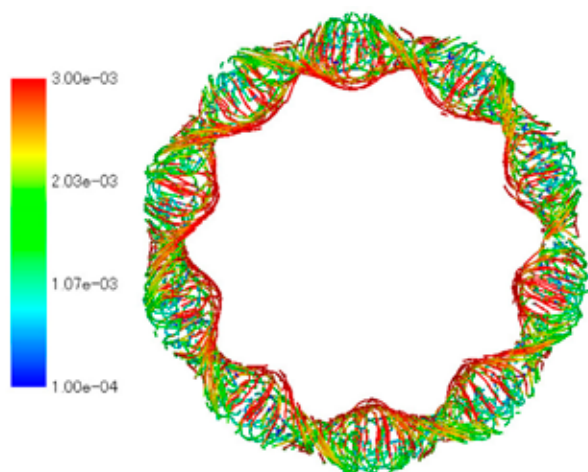


図1 LHD実験で得られた一次元プラズマ流れのデータを基に、三次元平衡シミュレーションを用いて計算したプラズマ全体での流れの様子を示しています。表示した線に沿ってプラズマが流れており、速度の大きさが青から赤への変化で示しています。実験で計測されているトラスの外側よりも計測されていない内側の方が流れが大きいこともわかりました。

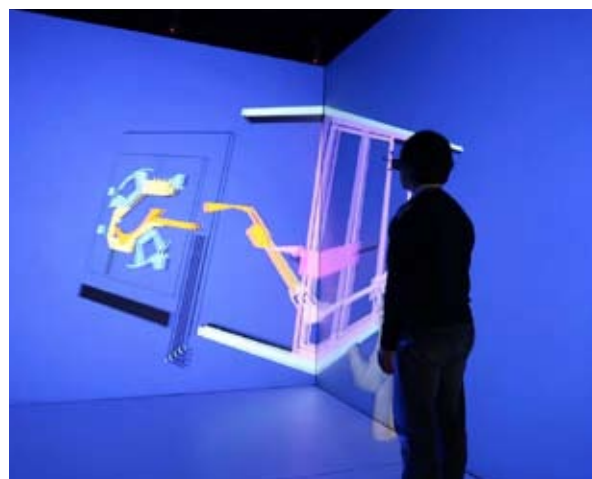


図2 ヘリカル型核融合エネルギー炉FFHR-d1の設計データをバーチャルリアリティ装置ComplexCopeに投影して、ロボットアームによる炉内機器の取り外しを確認している様子。

ズマの安定性に大きく影響を与えると考えられています。特に、この流れによるプラズマ回転が止まるとプラズマが不安定になりやすいことがLHD実験で確認されています。現在、この開発した手法を用いることにより、このプラズマの流れと安定性との関連に対する詳細なシミュレーション研究を推進しています。

数値実験炉研究プロジェクトでは、没入型バーチャルリアリティ装置ComplexCopeを使って、ロボットアームを含めた核融合炉の設計データをバーチャルリアリティ空間に投影して、炉内機器の位置関係やロボットアームの動きを、正確に三次元で確認できるシステムを構築しました。没入型バーチャルリアリティ装置は、仮想空間の中に自分自身が入って、あたかも目の前にモノが存在しているかのように感じる事ができる装置です。また、自分自身が動いたり、コントローラーを操作したりすることによって、視点をいろいろと変えることもできます。図2に示すように、今回開発したシステムを使うことで、自分自身が核融合炉の中や傍らに立って、機器の取り付けや取り外し、ロボットアームの動きを、あらゆる方向から確認することができます。あるいは自分自身の「手」を仮想空間に投影することで、機器をつかんで動かしたりすることもできます。これにより、炉内

機器の位置関係やロボットアームの動きを正確に把握し、部品同士がぶつからないかどうか、ロボットアームの動きやメンテナンス手順が適切かどうか等を、効率よく検討できるようになりました。

(数値実験炉研究研究総主幹/
核融合理論シミュレーション研究系 教授)

成果報告：核融合工学研究プロジェクト

室 賀 健 夫

核融合工学研究プロジェクトでは、将来のヘリカル型核融合炉を想定した概念設計と各機器の開発に必要な要素工学研究を、国内外の共同研究・連携研究と併せて進めています。以下に2017年度の主な成果を紹介します。

ヘリカル型核融合炉の概念設計では、これまでのFFHR-d1から、より小型化・強磁場化することでコスト低減を図るFFHR-c1に検討の重点を移しつつあります。物理計算を組み合わせた炉心プラズマ解析が進展し、核融合利得（核融合炉で発生するエネルギーと投入したエネルギーの比）として15を達成できる見通しが得られました（図1）。物理研究の進展や運転条件・装置形状の最適化によってさらに高い核融合利得の実現も見込まれています。併せて、強大な電磁力を支持する3次元構造物の電磁力解析も進展しています。

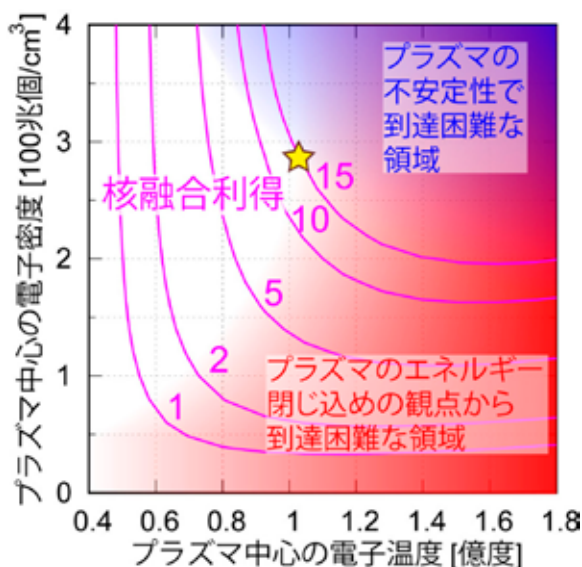


図1 ヘリカル型核融合炉FFHR-c1の運転領域解析の例。桃色の等高線は核融合利得。

核融合反応によって発生するエネルギーを熱に変換するとともに燃料を製造するブランケットについては、その構造材料として低放射化合金の開発を進めています。バナジウム合金NIFS-HEAT-2では、製法の最適化による高純度化によって延性（力がかかると引き延ばされることで割れを防ぐ性質）が格段に向上し、不純物の多い米国開発材で問題となっていた加工・溶接時の割れの発生を克服することができています。一方、不純物には合金を強化する働きもあるため、高純度化による強度低下の懸念がありましたが、核融合炉で想定される負荷条件では強度は米国開発材と変わらないことを確認しました（図2）。これにより、長時間運転が可能なブランケットの製作見通しを世界で初めて得ることができました。

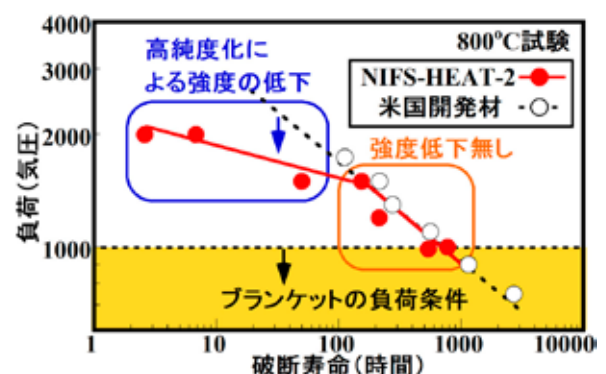


図2 低放射化バナジウム合金NIFS-HEAT-2に温度800℃で負荷をかけ続けたとき、伸びて変形し最終的にちぎれて破断するまでの寿命。

ブランケットの内部で循環させる高温液体に関する研究も行っています。総合工学実験棟の熱・物質流動ループOroshi-2の熔融塩ループでは磁場腐食試験部が稼働し（図3）、600℃を超える高温で流れる熔融塩に垂直方向に1テスラの磁場を

印加し、材料の腐食挙動を調べています。

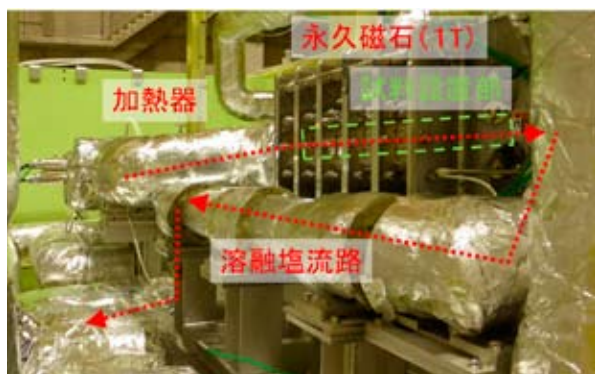


図3 熱・物質流動ループOrosshi-2、熔融塩ループの磁場腐食試験部。

超伝導マグネットの研究では、イットリウム系テープ線材を用いた高温超伝導導体の開発を進めています。線材を単純に積層したSTARS導体は短尺(3m)で10万アンペアの電流を達成しています。この導体構成において非一様な電流分布を強制的に与える模擬実験を行ったところ、導体全体として安定に通電できることが確認できました。今後、長尺導体の試験を超伝導マグネット研究棟の大口径高磁場導体試験装置を用いて実施すべく準備を行っています。

プラズマ対向機器に関する開発研究では、超高熱負荷試験装置ACT2を用いてタングステンと銅合金を接合したダイバータ機器の熱負荷に対する健全性を評価する研究を進めています。また、ブランケット機器の開発研究や冷却水の乱流化促進による除熱性能向上の研究などを国内外の大学や民間企業と連携して進めています。電子ビームの制御系の増設を行い、千分の1秒以下のパルス的な熱負荷を与えられるよう整備し、試験したところ、あらかじめヘリウムを照射したタングステンで表面の微細構造が大きく変化することが明らかになりました(図4)。

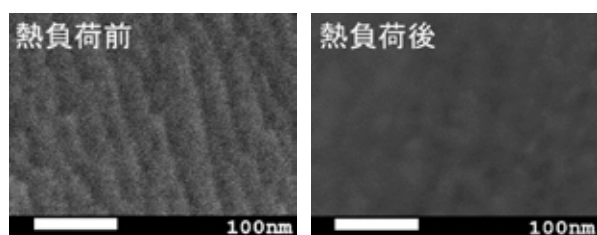


図4 ヘリウム照射を受けたタングステンにパルス的な熱負荷(1㎡あたり50万キロワット、1万分の5秒間)を与えた場合の表面画像の変化。周期的な段差構造が消失して緩やかな凹凸のみが見られるようになります。

ダイバータでは、その冷却部分となるヒートシンク材料の高性能化をめざして、先進的な粉末冶金技術の一つである機械的合金化法(MA法)、および、革新的な自由成形・大型化を見越せる熱間等方加圧法(HIP法)の組み合わせに注目しています。この技術は金属組織内部に微細で熱的に安定な化合物を分散させることで機械的特性を飛躍的に向上させるもので、さらに高性能な銅合金を目指した開発研究を進めています(図5)。

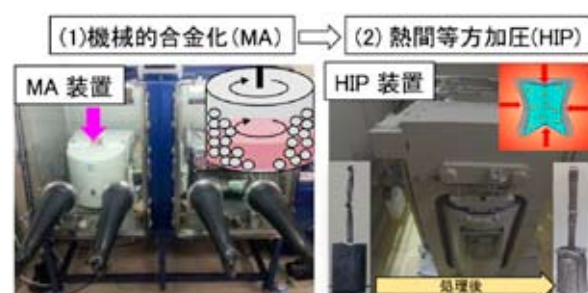


図5 分散強化銅の製造プロセス

タングステンと酸化物分散強化銅を接合する方式について、「先進的ろう付け接合法」を開発しています。小型の試験体において全ての接合箇所において接合界面の接合強度がタングステン素材よりも高いことを確認しました。この結果を踏まえて28枚のタングステン平板を酸化物分散強化銅に同時に接合させる大型のダイバータ試験体の製作を行ったところ、全てを確実に接合させることに成功し、お互いの間隔を0.5mmに一定管理する技術も確立しました(図6)。



図6 タングステンと銅合金をろう付け接合した大型ダイバータ試験体

(核融合工学研究研究総主幹
／核融合システム研究系 教授)

第2回LHD重水素実験国際ワークショップ

横 山 雅 之

核融合科学研究所では、2018年2月7・8日の2日間、「第2回LHD重水素実験国際ワークショップ」を開催しました。

LHDは2017年3月に重水素実験を開始しました。重水素実験開始に先立ち2016年2月に開催された第1回のワークショップ（NIFSニュースNo.229）では、国内外の関連研究の経緯や現状を共有し、LHD重水素実験における研究課題や国際共同研究の可能性について議論しましたが、今回は、重水素実験の実施後初めての国際ワークショップということで、得られた研究成果を紹介し、今後の展開を議論することが大きな目的でした。

ワークショップには、国内外から延べ100名超の参加がありました。また、来訪はできないがワークショップにはぜひ参加したいという海外共同研究者からの強い要望もあり、Web会議システムでの参加も可能としました。アメリカ、ヨーロッパ、オーストラリアや中国の研究者がWeb会議システムを通じて参加するなど、国際性の高いワークショップとなりました。第1回ワークショップの後に創設した「国際プログラム委員会」を通じた案内周知も功を奏しました。

ワークショップでは、主に以下のような議論が行われました。核融合研究における世界的かつ挑戦的な研究課題である「水素同位体効果」に関して、重水素プラズマの方が軽水素プラズマに比べて閉じ込め性能が高いという実験データが紹介され、乱流シミュレーションによる予測との整合性や、乱流計測などの精緻な研究への展開が議論されました。来訪しての参加となったマックスプランクプラズマ物理研究所（ドイツ）の新進気鋭の研究者2名からは、同研究所のトカマク装置ASDEX-Uでの水素同位体効果研究の最新情報や、ヘリカル型装置Wendelstein 7-XとLHDとの比較研究計画などが紹介されました。彼らとは、ワークショップ後にも別途議論を行い、この3装置での国際共同研究を行うこととしました。

「高エネルギーイオンの閉じ込め」に関しては、Web会議システムで参加していた米国の研究者から、予定時間を超えて多くの質問やコメントが出されました。重水素実験で初めて可能となった計

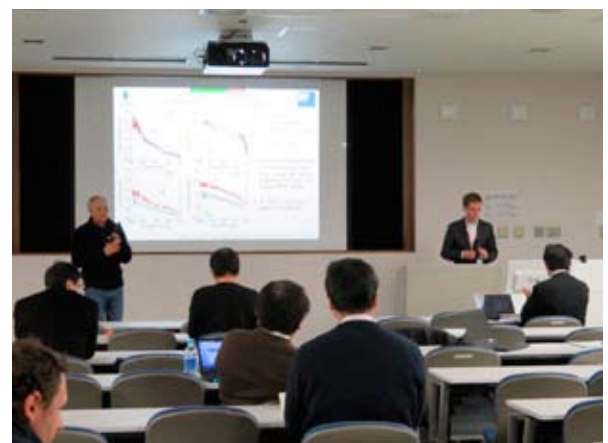
測や加熱ビームのイオン種交換などの実験的ツールと、精緻なシミュレーション研究が相まって研究成果が高まっている現状を反映した活発な議論となりました。

「プラズマと対向材料との相互作用」に関しては、LHD重水素プラズマにおけるダイバータ（プラズマからの粒子や熱の排気機構）特性や、中性粒子の挙動に関する実験データが紹介されました。また、来訪しての参加となった磁場核融合研究所（フランス）の研究者から、トカマク装置WESTにおける定常運転研究の方向性（特に、プラズマ対向材料の素材の違いによる定常性能への影響調査など）が紹介され、LHD重水素実験との間で共同研究を進めていく意欲が示されました。

ワークショップの最後には、平成30年度のLHD実験への実験提案の方法・時期などが示され、会場のみならず、Web会議システムを通じても様々な議論が行われ、実験参加の意欲や関心の高さを改めて感じました。本ワークショップで発表や議論が行われた多くの研究成果は、解析や考察をさらに進めて、今年10月にインドで開催される国際原子力機関（IAEA）主催の核融合エネルギー会議などの場でも広く国際的に発信していきます。

なお、本ワークショップは、自然科学研究機構戦略的国際研究交流加速事業及びネットワーク型研究加速事業の支援により開催しました。

（核融合理論シミュレーション研究系 教授）



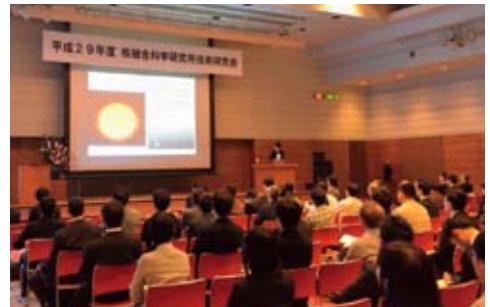
会場の様子。表示されている講演資料はWeb会議システムを通じて海外からの参加者と共有されている。

平成29年度核融合科学研究所技術研究会を開催

平成30年3月1日・2日の両日、多治見市産業文化センターにおいて、平成29年度核融合科学研究所技術研究会を開催しました。全国の大学、高等専門学校及び大学共同利用機関等36機関から約170名の技術職員の参加がありました。

本研究会は、大学及び研究機関の技術職員が日常業務で携わっている実験装置の維持管理から開発改良にわたる広範囲な技術活動について発表する研究会です。発表内容も通常の学会とは異なり、日常業務で生まれた創意工夫、苦労話、失敗談も重視して、技術職員の交流と技術の向上を図ることを目的としています。本研究会は昭和50年に分子科学研究所で始まり、平成8年度からは大学主催による分散型の技術研究会と、実験・実習分科会などを加えた総合技術研究会とを年1回ずつ交互に開催しています。参加機関及び参加者は年々増加しており、今回は核融合科学研究所主催としては7回目の開催となります。

開会式、長壁LHD計画実験統括主幹による特別講演、三宅計測技術課長（当時）による代表講演に続いて、各セッションが実施されました。セッションは工作技術、装置技術、計測・制御技術、極低温技術、情報・ネットワーク技術の5分野で構成され、口頭発表39件、ポスター発表32件の発表が行われました。各分野の発表では、研究・教育支援のための装置システムや特殊機器の設計・製作、日常的な業務の改善、実験・研究装置の保守点検状況やその分析、安全衛生に関わることに至るまで、それぞれの技術職員が取り組む課題についてそれぞれの立場で発表がなされ、有意義な情報交換の場となりました。



長壁実験統括主幹による講演の様子

最終講義が行われました

平成30年3月31日をもって退職された廣岡慶彦先生の最終講義が、平成30年3月20日に核融合科学研究所で行われました。「Livin' life as a minority... Has it been good or bad?」と題された講義には、研究者や大学院生らが多数集まり、最後まで熱心に聞き入っていました。



最終講義の様子

平成30年度総研大夏の体験入学のご案内

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理工学及び核融合工学に関連した最先端の研究現場を体験していただくことを目的として、平成30年8月20日から24日にかけて夏の体験入学を開催します。核融合プラズマの閉じ込め・加熱・計測に関わる実験及び理論的研究、プラズマ・シミュレーション研究、核融合炉設計・応用研究のための工学的研究等、10課題を超える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。夏の体験入学の詳細は、核融合科学専攻ホームページ（<http://soken.nifs.ac.jp/>）をご覧ください。



昨年度の夏の体験入学の様子



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.241

2018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 : <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、直接本研究へご連絡ください。