

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

NIFS NEWS

No.211



2013
APR/MAY

研究最前線 …… 2-5

LHD第16サイクル実験成果 山田 弘司
バーチャルリアリティ装置でプラズマの世界を探検しよう 大谷 寛明

滞 在 記 …… 6

ユニバーシティ・カレッジ・ダブリン滞在記 鈴木 千尋

会 議 報 告 …… 7

6th International Workshop on Stochasticity in Fusion Plasmas 鈴木 康浩

トピックス …… 7-8

平成25年度科学技術分野の文部科学大臣表彰 若手科学者賞を受賞
日本物理学会若手奨励賞を受賞
最終講義が行われました
総研大核融合科学専攻より2名の博士号学位授与者
岐阜県、土岐市、多治見市、瑞浪市と核融合科学研究所周辺環境の保全等に関する協定書等を締結
平成25年度総研大夏の体験入学のご案内

LHD第16サイクル実験成果

山田 弘 司

我が国独自のアイデアによる世界最大の超伝導核融合実験装置である大型ヘリカル装置(LHD)では、第16サイクルプラズマ実験を平成24年10月17日から12月6日にかけて実施しました。得られた成果は4月10～12日に研究所で開催しましたプロジェクト成果報告会においてご報告するとともに、国際会議や学術誌での発表準備を進めています。この研究最前線では、そのあらましをご紹介します。

LHDは大学共同利用機関である核融合科学研究所の中心となる共同利用装置であり、日本だけでなく海外の大学や研究機関の研究者に開かれた研究施設です。共同研究として提案された約260の課題に、600名を超える研究者や大学院生が取り組み、核融合科学の進展に資する成果を得ました。海外からも約60名が実験に参加し、国際共同研究を進めました。

第16サイクルプラズマ実験においては、超高温にプラズマを加熱する方法に大きな進展がありました。イオン温度については、運転方法の改善により、昨年度、記録された8,000万度を超える8,500万度を達成するとともに、このような高いイオン温度を再現性良く実現することができるようになりました。また、電子温度についても、加熱するマイクロ波の周波数を77ギガヘルツから154ギガヘルツへ倍増させた新しい加熱装置の導入により、これまでできなかった高い密度での電子の加熱が可能となり、10兆個/ccの密度で1億5,000万度の電子温度が得られました。このマイクロ波の高周波数化によって、核融合の密度条件である100兆個/ccの高密度においても有効な加熱が期待できます。これらの成果により、核燃焼プラズマを見通すために1億2,000万度の温度を密度20兆個/ccで達成するというLHDの最終目標に向かって、さらに一歩前進することができました。

将来の核融合発電炉では、その炉心は、密度100兆個/cc以上の密度でイオン温度と電子温度が1億2,000万度を超える超高温のプラズマ状態にあ

ります。この密度は大気の20万分の1程度であることから分かるように、非常に希薄なガス状態でもあります。このような超高温までにプラズマを加熱するために高速の原子のビームや、プラズマ中のイオンあるいは電子と共鳴する電磁波を用います。これらの手法は、それぞれイオンを加熱するのが得意なものと、電子を加熱することが得意なものに分かれます。LHDでは複数の加熱手法を用いて、イオン温度と電子温度がそれぞれ1億2,000万度のプラズマを密度20兆個/ccで実現することを最終目標としています。LHDの装置規模の実験において、この数値目標を実証することが、将来の核融合発電炉の炉心プラズマを見通すことにつながります。

図1にこれまでで最高のイオン温度を得たプラズマ中のイオン温度分布を示します。第16サイクルでは、FM周波数帯の電磁波を用いてヘリウムのプラズマを点け、このプラズマによって壁を洗浄する、すなわち壁に吸着されていた水素をはき出させる運転の改善を進めました。これによって高速の原子ビームがプラズマ中心を加熱する効率を向上させることができ、一昨年度と同じ加熱電力

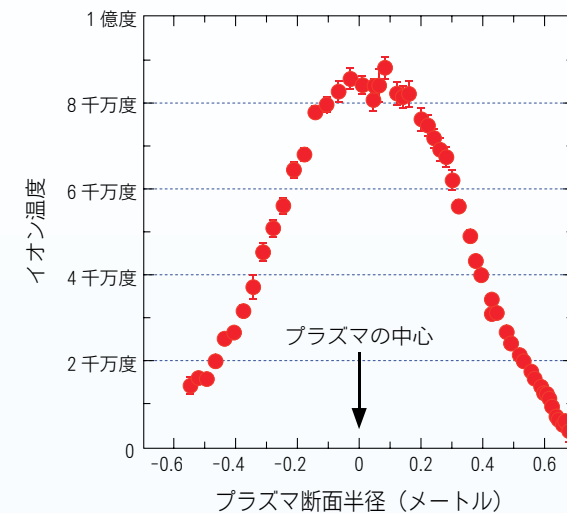


図1 最高イオン温度8,500万度を記録したプラズマ中のイオン温度分布

であっても、温度を500万度上昇させることができました。これには、図1に示したようなプラズマ中の温度や密度の分布やその時間変化を捉える計測がより高精度化され、それらの実験データを用いた理論的な解析がより精密となり、プラズマの中で何が起きているかの理解が深まったことが貢献しています。第16サイクルでは、このような高いイオン温度の状態を格段に再現性良く、より確実に得られるようになりました。具体的には、イオン温度8,000万度以上を達成したプラズマの放電回数は昨年度の4倍となり、実験データを充実させて、より詳細、精密な物理の議論が進められるようになりました。

電子の加熱には磁場中での電子の回転運動に共鳴するマイクロ波が有効です。回転運動と同じあるいは倍数の周波数を持った電磁波が同期することによって電磁波からエネルギーをもらい電子の温度が上がります。ところが、プラズマの密度が上がると、電磁波がプラズマ中を伝わりにくくなり、ある密度(遮蔽密度と言います)以上では全く伝わりません。高い密度のプラズマを加熱するためには高い周波数の電磁波が必要となります。第16サイクルプラズマ実験では、これまで使用してきた77ギガヘルツに加えて、筑波大学と共同で新たに研究開発した2倍の周波数(154ギガヘルツ)のマイクロ波を発生させることができるジャイロトロンと呼ばれる発信管が稼働し始めました。図2に電子の温度と密度でみた達成領域の拡大を示し

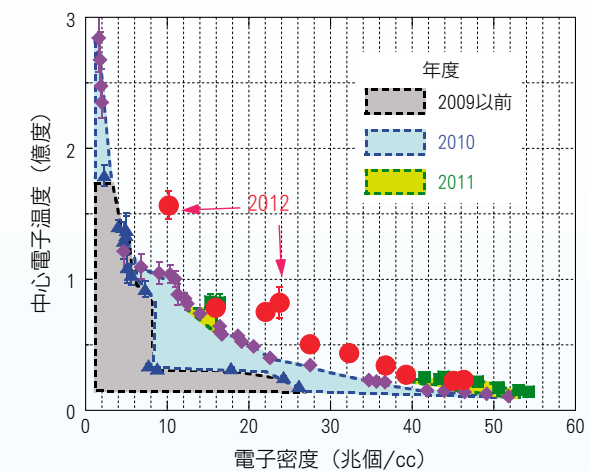


図2 電子温度と電子密度で見た達成領域。赤丸が平成24年度に高周波数のマイクロ波によって得られた新データです。これまでに比べ、より高温・高密度のプラズマが生成されていることが分かります。

ます。今年度のデータを赤丸で示しており、新しい領域が拓かれたことが分かります。また、図3に77ギガヘルツと154ギガヘルツのマイクロ波を用いた加熱実験の結果を横軸プラズマの密度、縦軸を加熱効率として示します。154ギガヘルツでは77ギガヘルツの2倍近い140兆個/ccのプラズマまで加熱できました。この新しいジャイロトロンにより、これまで10兆個/ccでの密度では1億度であった電子温度を、同じ密度で1億5,000万度まで上昇させることができるようになりました。

本報では第16サイクル実験の成果について、これまでになかったプラズマ性能を得たことを中心にご紹介しました。これらは得られた研究成果の一部です。プラズマが自ら磁場をドラマチックに変化させる現象やプラズマから壁への熱の逃げが大きく減る現象を理解し、制御する研究の進展など世界的に注目される成果がありました。さらに得られた実験データをつぶさに吟味し、国際的に認められるよう国際会議や国際学術誌に発表していきます。

最後になりましたが、LHD実験をあたかく見守ってくださっている皆さまに改めて御礼申し上げます。この9月26日開始予定の平成25年度の第17サイクル実験においても、引き続き、ご支援を賜りますよう、よろしくお願い申し上げます。

(大型ヘリカル装置実験計画 研究総主幹)

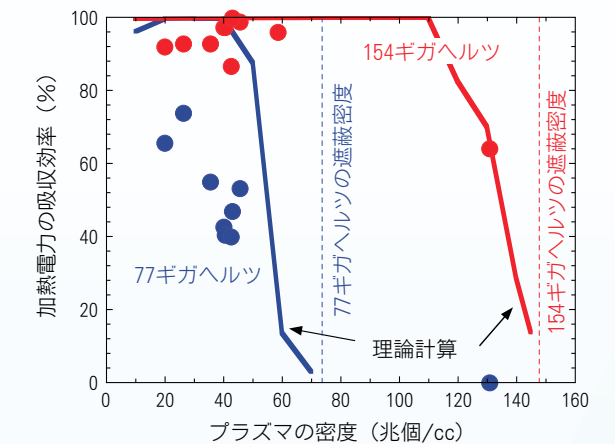


図3 マイクロ波の周波数の増加による高い密度での加熱が実証されたデータ。実線が理論計算からの予測で、丸印が実験結果です。点線はそれぞれの周波数の電波が、これ以上では伝わらなくなる密度の上限を示しています。

バーチャルリアリティ装置でプラズマの世界を探検しよう

大谷 寛 明

3次元テレビや3次元映画、3次元ゲーム機などをみなさんは見たり使ったりしたことがありますか？まるで目の前にモノが浮かんでいるように見えて、とても驚いたのではないのでしょうか。これは立体視という手法を使って、平面に映し出された画像を立体的に見せています。人間は右目と左目でわずかに異なる映像を見て（これを視差といいます）、その左右の違いを脳が認識してモノを立体的に見ています。この視差を利用した立体視の手法を3次元テレビなどでは採用しています（実際に人間が立体的にモノを見るときは、視差の他に、眼球の動きや水晶体の厚さの変化、影の付き方、対象の大きさなど、様々な要因を統合しています）。

核融合科学研究所（NIFS）には、あたかも目の前にモノがあるかのように見せることができるバーチャルリアリティ装置“CompleXcope（コンプレックスコープ）”があります（図1）。モノが浮かんで見える仕組みは3次元テレビなどと同じですが、CompleXcopeでは、大きなスクリーンで囲まれた部屋の中でモノが浮かんで見えるので、自分がまるでそのモノに取り囲まれたように感じることができます。また、見ている人が体を使っていろいろと視点を変えることができるので、そのモノを中から見たり外から見たり、

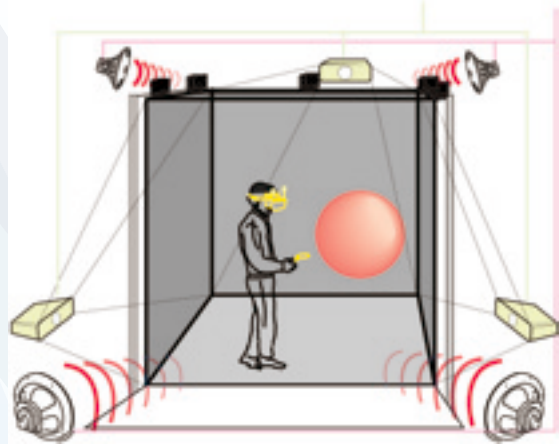


図1 没入型バーチャルリアリティ装置“CompleXcope”の模式図。

いろいろな方向から見ることでも、コントローラーで動かしたりすることもできます。CompleXcopeで映し出される映像はコンピュータによって作り出され、様々な動きが制御されています。例えば飛んでいるボールがあれば、そのボールを飛ばし続けることもできます。このように、本当はそこにモノが存在しないが、まるでモノがあるように見えたり感じたりできる世界をバーチャルリアリティの世界と呼びます。

図1のような没入型バーチャルリアリティ装置は1993年に発表されて以来、世界中に普及しています。その中でも科学的な可視化を行うことを目的として日本で最初に導入されたのがNIFSのCompleXcopeです。それ以来、シミュレーションデータの可視化だけでなく、観測データの可視化、構造物の設計支援システム、医学分野への応用などを行ってきました。現在も神戸大学や兵庫県立大学、甲南大学、海洋研究開発機構などとの共同研究でCompleXcopeを使った可視化研究を進めています。ここでは、最新の成果として、シミュレーションと実験装置データの同時可視化と時系列データのバーチャルリアリティ可視化の研究について紹介します。

磁場に閉じ込められた高温のプラズマは複雑な振る舞いを示します。この複雑な現象を調べるため、スーパーコンピュータなどを使ったシミュレーション研究が行われています。シミュレーション研究は複雑な高温プラズマの様子をコンピュータの中で再現します。再現されたプラズマの中で、3次元的に複雑な構造を示す磁場や荷電粒子の運動の様子を様々な視野方向から観測してより直感的に現象を探索するため、CompleXcopeを使った可視化研究を推進しています。図2は、NIFSの大型ヘリカル装置（LHD）の平衡プラズマのシミュレーション結果をLHD真空容器の内部に表示した結果です。真空容器の内部は実験装置の設計で使われているデータを使っているので、プラズマを加熱するためのアンテナや、プラズマ周辺からやってくる不純

物などを排気するダイバータ板の配置も忠実に再現しています。真空容器の中にプラズマのシミュレーション結果を表示することで、プラズマと実験装置の空間的な関係を調べたり、複雑な磁場の構造を直感的に調べたりすることができます。図2では、プラズマを閉じ込めている磁気面（閉じた磁気面）や、周囲の磁場の構造から孤立して島状になった磁気島、磁力線の構造が複雑になっているストカスティック領域の様子が描かれています。

図3は、磁力線の再結合に関するシミュレーションの結果をCompleXcopeで解析している様子とその結果です。時々刻々変化するプラズマの様子を、その時間変化を含めてバーチャルリアリティ空間にムービーで再現したり、再結合した磁力線の様子やその電磁場の中で複雑な軌道を描くイオンの様子を調べたりすることができます。この研究により、磁力線再結合とイオンの複雑な軌道との関係を直接調べることができました。この研究によって、プラズマ中の粒子の急速な加熱現象等の解明が進み、核融合プラズマの理解がさらに進展するものと期待されます。

このようにCompleXcopeを使えばコンピュータが作る様々なバーチャルリアリティの世界に観測者が入り込むことができ、人間の空間を認

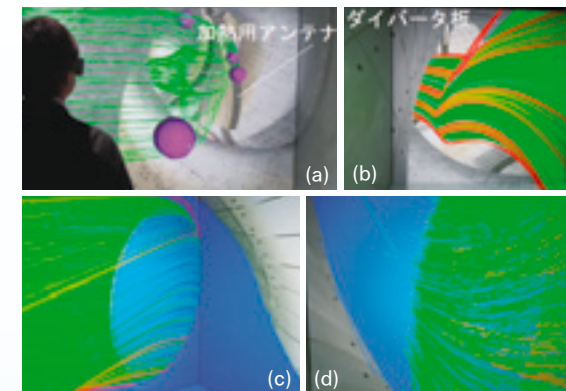


図2 LHDプラズマのシミュレーション結果を実験装置の中に表示。プラズマを加熱するためのアンテナやダイバータ板が図(a)と(b)に表示されています。図(a)のマゼンタの球はプラズマに閉じ込められた粒子です。CompleXcopeの中ではこの粒子が動く様子を見ることができます。緑と赤の線はそれぞれ1本の磁力線を表します。青い面の上には磁力線と青い面の交点が表示され、磁場の構造を調べることができます。図(c)の緑の磁力線は閉じた磁気面を、赤の磁力線は磁気島を形成しています。それらの3次元的な構造を図(b)のように見ることができます。図(d)では複雑な磁場構造（ストカスティック領域）を形成していることが分ります。

識する能力を総動員して物理現象を「目の当りに」観測することができます。また、時間の流れとともに複雑に変わっていくプラズマを、時間を進めたり止めたりしながら、プラズマの世界を探検することができます。プラズマを作っている粒子一つ一つの動きを見たり、プラズマを閉じ込めている磁場の構造が、いろいろと形を変えていることを知ったりすることもできます。さらに、CompleXcopeによる可視化はシミュレーション結果の解析だけではなく、実験結果の解析や炉設計でも大いに役立つと期待されています。今後、様々な分野の研究者と協力しながら、バーチャルリアリティ装置による可視化の研究を進めていきたいと思ひます。なお、CompleXcopeはNIFS施設見学コースのオプションコースのひとつですので、一般の方にも体験していただくことができます。みなさんもこのバーチャルリアリティの世界を探検してみませんか？

（基礎物理シミュレーション研究系・准教授）

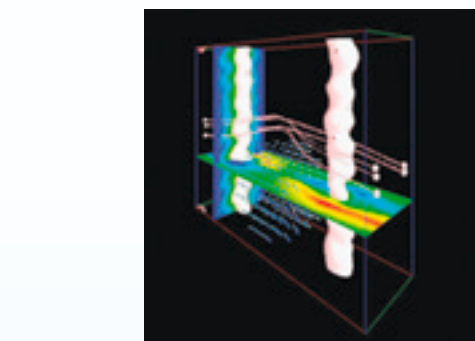
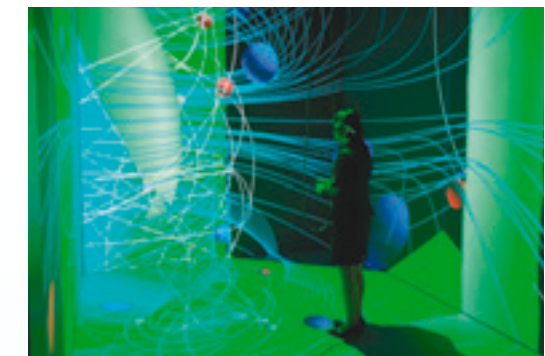


図3 磁力線の再結合のシミュレーション結果の可視化。上図で青線と白線はそれぞれ磁力線とイオンの粒子軌道を、赤球と青球は磁力線の出発点と終点を、緑の面はプラズマ圧力の等値面を表します。下図でピンク線は磁力線を、ピンクの面は粒子の等密度面を、2枚のカラーマップはそれぞれ磁場と等密度面の様子を、矢印は磁場の構造を表します。ムービーのようにプラズマの構造が複雑に時間変化していく様子を見ることができます。

ユニバーシティ・カレッジ・ダブリン滞在記

鈴木千尋

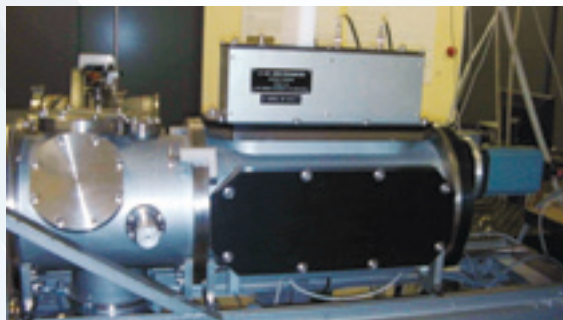
2012年5月8日から7月4日までの約2ヶ月間、アイルランドの首都ダブリンにあるユニバーシティ・カレッジ・ダブリン(UCD)に滞在し、理学部物理学のO'Sullivan教授と共同研究を行う機会を得ました。UCDは、ダブリン中心部から南に4キロほど離れた場所に133ヘクタールの広大なキャンパスを擁し、学生数は20,000人以上を数える総合大学です。同教授の研究室では、レーザー生成プラズマ装置を用いて、原子番号の大きい(高Z)イオンからの極端紫外(EUV)領域の複雑な発光スペクトルの研究を行っています。スズや希土類元素などの高ZイオンからのEUV領域の発光は、将来の半導体微細加工のための露光装置用光源などへの応用が期待されているため、産学連携にも積極的で、同じフロアに研究室からスピノフした光源開発のためのベンチャー企業も同居しています。また国際交流も盛んで、アジアを含む各国から留学生を受け入れています。

核融合プラズマは、レーザー生成プラズマとは密度・温度領域が大きく異なりますが、高Zイオンの発光スペクトルの解析やモデルの検証には適しているため、本研究所では大型ヘリカル装置(LHD)のプラズマを光源として利用し、上述の光源開発で重要な元素をプラズマ中に入射してスペクトルを調べる研究を以前から実施しており、これまでも同教授はたびたび本研究

所を訪問して、共同研究を進めてきた実績があります。私の今回の滞在は、同教授からアイルランド科学協会(Science Foundation Ireland)の短期招へい事業に応募し、採用されたことにより実現しました。

UCDでは、先にLHD実験で取得された、希土類多価イオンのEUVスペクトルと、レーザー生成プラズマからのスペクトルの比較・検討に必要な基礎データを取得するための実験に取り組みました。ガドリニウムなどの希土類元素ターゲットを作成して真空容器内のステージに設置し、レーザー照射により生成されたプラズマからのEUVスペクトルを、分光器で観測しました。学生さんやスタッフの支援を受けながら、可動ステージ・真空排気系・レーザー光学系の組み上げといった実験準備から始めましたが、LHD実験とは勝手が違い、予想以上に時間を費やしました。滞在の半ばもすぎた頃ようやく実験準備が整い、一通りのデータが取得できたのは帰国直前でしたが、慌ただしい日々の合間の週末には、アイルランドならではのパブを訪れたり、郊外の風光明媚な自然を楽しむ機会もあり、良い息抜きとなりました。なお今回の共同実験の成果は、同年9月にドイツで開催された「第16回多価イオン物理に関する国際会議」にて発表しました。

(高温プラズマ物理研究系 助教)



真空紫外分光器



物理学科の建物

6th International Workshop on Stochasticity in Fusion Plasmas

鈴木康浩

2013年3月18日から21日までの4日間、ドイツ・ノルトライン＝ヴェストファーレン州ユーリッヒにて6th International Workshop on Stochasticity in Fusion Plasmas(SFP2013)が開催されました。この会議はユーリッヒ中央研究機構(Forschungszentrum Jülich)が主催して2年に1回開催される、核融合プラズマにおける統計的な磁力線構造の役割について議論が行われる国際会議です。発表件数は45件で、日本からは核融合科学研究所から5名が参加しました。この会議は、国際会議としては小規模ですが、この分野の専門家が参加するために非常に密度の濃い議論が行われます。参加者の多くが互いによく知る間柄であり、アットホームな雰囲気の中で議論を戦わせます。今回の会議では、国際熱核融合実験炉(ITER)機構からも2名の参加があり、この会議の国際的な認知度が上がりつつあることが伺えました。

招待講演では、本研究所の居田克巳教授が熱パルス輸送と電場計測を用いた磁場構造の同定手法について発表しました。この研究は大型ヘリカル装置(LHD)実験にてその有用性が実証

され、国際的に高く評価されている研究です。筆者は、LHD実験の結果と数値モデリングの比較を通じた磁場構造の推定について口頭発表し、数値モデリングの妥当性検証の1つの方法であるとの結論が得られました。

例年、この季節のドイツは長い冬が終わり春の始まりを感じさせるのですが、今年は異常気象でした。初日は0度近い気温であったもののよく晴れたのですが、それ以外の日は雪交じりの強い風が吹かなか会議が行われました。次回は、2年後の2015年にユーリッヒで開催予定です。

(核融合理論シミュレーション研究系 助教)



SFP2013参加者の全体写真

TOPICS トピックス

平成25年度科学技術分野の文部科学大臣表彰 若手科学者賞を受賞

本研究所プラズマ加熱物理研究系の永岡賢一助教が、「プラズマ中の高エネルギー粒子損失過程の研究」によって、平成25年度科学技術分野の文部科学大臣表彰若手科学者賞を受賞しました。将来の基幹エネルギーの候補である核融合による発電を実現するためには、高エネルギー粒子がプラズマを効率良く加熱することが必要です。今回の受賞は、高エネルギー粒子とプラズマ中で起こる波との相互作用を観測することに成功し、高エネルギー粒子の損失過程を世界で初めて明らかにしたことが評価されたことによるものです。本研究により、今後の核融合燃焼プラズマ研究のさらなる進展が期待されています。



日本物理学会若手奨励賞を受賞

3月26日から29日まで広島大学東広島キャンパスで開催された日本物理学会2013年次大会にて、本研究所プラズマ加熱物理研究系の伊神弘恵助教が「日本物理学会若手奨励賞」をプラズマ基礎・プラズマ科学・核融合プラズマ・プラズマ宇宙物理を取り扱う領域2において受賞しました。この賞は将来の物理学を担う優秀な若手研究者の研究を奨励し、学会をより活性化するために設けられたものです。伊神助教の受賞は、磁化プラズマ中を伝播する静電波の電子パーンシュタイン波を、効率良く励起するための新たな電磁波入射手法を理論的／実験的に示した論文が評価されたものです。

最終講義が行われました

平成25年3月31日をもって退職された先生方の最終講義が、3月12日に行われました。会場となった核融合科学研究所の会議室には、所内外から研究者や学生が訪れ、熱心に話に聞き入りました。

講義題目は以下の通り(職名および所属は当時のもの)



朝倉大和教授
(装置工学・応用物理研究系)
「38年間の研究人生を振り返って」



川端一男教授(研究主幹)
(高温プラズマ物理研究系)
「核融合研究の40年」



富田幸博准教授
(理論シミュレーション物理研究系)
「将来はアドヴァンスド燃料核融合!」

総研大核融合科学専攻より2名の博士号学位授与者

平成25年3月22日、総合研究大学院大学(総研大)葉山本部にて学位記授与式が行われました。核融合科学専攻からは、武村勇輝さん、朝日良光さんの2名の学生が学位授与式に出席し、博士の学位を授与されました。学長から一人一人に学位記が手渡され、修了生は学生生活の締めくくりとして感慨もひとしおのようでした。



左3人目から武村さん、朝日さん

岐阜県、土岐市、多治見市、瑞浪市と核融合科学研究所 周辺環境の保全等に関する協定書等を締結

核融合科学研究所は、平成25年3月28日、岐阜県、三市(土岐市、多治見市、瑞浪市)と、核融合科学研究所周辺環境の保全等に関する協定書及び核融合科学研究所周辺環境の保全等に関する覚書を締結しました。

同日、土岐市文化プラザで行われた協定書等の締結式には、古田肇岐阜県知事、加藤靖也土岐市長、古川雅典多治見市長、水野光二瑞浪市長、小森彰夫核融合科学研究所長が出席し、協定書と覚書の締結を行いました。引き続き、古田岐阜県知事、三市市長から、重水素実験開始の同意書に署名が行われました。

締結式後、小森所長があいさつを行い、研究所は、協定書・覚書を遵守し、研究の安全性を最優先に、市民の皆様と関係自治体のご理解を得つつ、安全で環境に優しい核融合エネルギーの実現に向けて、研究を行っていくことを約束しました。



協定書等に署名する左から古田知事、加藤市長、小森所長、古川市長、水野市長

平成25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、大学院への進学を考えておられ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25年8月26日から30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・計測に関わる実験並びに理論的研究、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など、10課題を越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けます。夏の体験入学の詳細は、核融合科学専攻ホームページ(<http://soukenweb.nifs.ac.jp/>)をご覧ください。



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.211 (2013年4, 5月号)

〒509-5292 岐阜県土岐市下石町322-6
TEL: 0572-58-2222 (代表) 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》

本誌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 著作権の転載・翻訳のような、複写以外の許諾は、直接本研究所へご連絡ください。