

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.205



2012
APR/MAY

研究最前線 …… 2 - 5

LHD第15サイクル実験成果 山田 弘司

電子バーンシュタイン波を用いた高密度プラズマの加熱 吉村 泰夫・伊神 弘恵

会議報告 …… 6

MHD平衡と安定性に対する三次元磁場の効果に関する日米ワークショップ 渡邊 清政

滞在記 …… 7

カールスルーエ工科大学滞在記 高山 定次

トピックス …… 8

平成24年度科学技術分野の文部科学大臣表彰を受賞

日本物理学会 第17回論文賞・第6回若手奨励賞・領域2 学生優秀発表賞

総研大核融合科学専攻より4名の学位授与者

平成24年度総研大夏の体験入学のご案内

LHD第15サイクル実験成果

山田 弘 司

世界最大の超伝導定常プラズマ実験装置である大型ヘリカル装置(LHD)の第15サイクル実験は昨年7月28日から開始し、10月20日に終了しました。LHDは大学などの研究者の共同利用装置であり、実験は国内外の研究者による共同研究として行われています。第15サイクルでは提案された267の実験課題に取り組みました。この中には1億度に迫る高いイオン温度を目指すようなプラズマ性能の向上をねらうもの、プラズマを閉じ込める磁力線構造の変化とその影響を物理として明らかにしようとするもの、また、プラズマを光源として使い、天文学や産業応用への展開を図るものなど、様々な提案があります。これらの多種多様な課題はすべてが束ねられ、また互いに刺激し合い、核融合エネルギーの実現に必要な学術基盤を築くために貢献しています。

実験は、行ってすぐ結果が目に見えるものもありますが、データを詳しく調べ、吟味するために時間がかかるものがほとんどです。結果が目に見えるものであっても、なぜそうなったか、実験前の考えを検証しないと次につながりませんし、うまく行った結果だけに注目して、うまく行かなかったことに目をつぶる訳にもいきません。得られた実験データの解析を進めることによって、多くの成果を得ることができました。これらの成果は4月9-11日に研究所で開催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、その一端をご紹介します。

第一の成果は、プラズマ中心のイオンの温度が8,000万度を超える高温のプラズマを生成することに成功したことです。これまでの最高イ

オン温度は7,500万度であり、核融合エネルギー実現を見込むために必要な1億度以上の目標にさらに、一歩近づきました。図1にその時のイオン温度のプラズマ中の分布を示します。定常方式では世界最高の記録です。プラズマを加熱する電力はこれまでと同じですが、今回、イオンの温度を上げることができた理由はプラズマの周辺部にあるガスを制御することに成功したことにあります。これまで真空容器の壁に吸着したガスが放出されることによってプラズマの周辺の密度が上がる傾向にありましたが、電磁波によって生成したプラズマを使って、あらかじめ壁を洗浄して吸着したガスを取りのぞくことによって、周辺の密度が下がることが分かりました。これによりプラズマ中心部までより多くの加熱が届き、温度が上がりました。今年度は、「閉構造ダイバータ」と呼ばれる高性能排気装置の本格運用が始まり、周辺の密度の制御性が大きく向上しますので、さらに好ましい状況が期待されます。

磁力線の構造を制御することによって好ましい効果をもたらす実験に、大きな進展が見られ

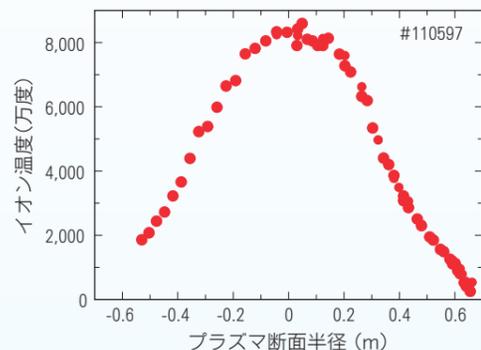


図1 最高イオン温度を記録したプラズマ中のイオン温度分布。プラズマ断面半径位置0がプラズマの中心。

ました。ここでは、プラズマを閉じ込めるための磁力線でできた磁場の容器を作る超伝導磁石に加えて、プラズマの周辺部の磁場を制御する電磁石(補正コイルとも呼ばれます)を用います。この補正コイルによってプラズマの周辺部の磁場をわずかに制御することにより、高温プラズマによる真空容器内壁への熱負荷を大幅に減少させることに成功しました。これは将来の核融合炉の耐久性を改善させることのできる重要な成果です。具体的には、プラズマで起こる不安定性によって生じる間欠的かつ衝撃的な熱負荷を抑制すること、プラズマの中心部の温度を下げることで周辺部の温度を下げ、熱いプラズマが壁に近づかないようにすることができました。まず、間欠的な不安定性が発生する条件を作り、これに周辺部の磁場を効かせると、不安定性の発生は頻繁になるのですが、一つ一つの熱負荷が小さくなることが分かりました。これによって壁への熱負荷は時間的に均等化され、大幅に減少しました(図2)。また、これとは別になりますが、壁の熱負荷を下げるには、プラズマの密度を上げることで、プラズマから光として逃げるエネルギーを増やし温度を下げるのが有効です。図3に1秒間に光として逃げるエネルギーと密度との関係を示します。赤丸が通常の運転時のものであり、密度がある上限を超え

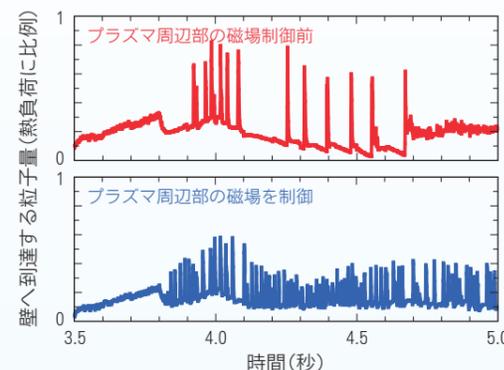


図2 プラズマが高温になると間欠的にプラズマが真空容器の壁に逃げる現象が発生します(赤)。プラズマの周辺部の磁場を制御すると(青)間欠的に逃げる頻度は高まりますがピーク量が減少し、全体として壁への負荷を数分の1に減少させることに成功しました。

ると、急激に光として逃げるエネルギーが増大し、プラズマは中心部も冷えてしまいます。一方、プラズマの周辺部の磁場を制御すると、青丸で示すように、比較的低い密度から光として逃げるエネルギーが大きくなるのですが、かなり広い範囲の密度で、この光として逃げるエネルギーが一定となります。この条件では、プラズマの中心部は高い温度に保たれつつ、周辺部では十分に温度が下がり、壁への熱負荷はほとんどなくなりしました。

第15サイクル実験の成果の全てはここでは紹介しきれませんが、特に、今年の10月に米国サンディエゴで開かれる国際原子力機関主催の第24回核融合エネルギー会議で約20件の発表をすべく、検討をさらに進めています。

最後になりましたが、日頃より、LHD実験をあたた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。今年8月29日開始予定の平成24年度の第16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。

大型ヘリカル装置計画 研究総主幹

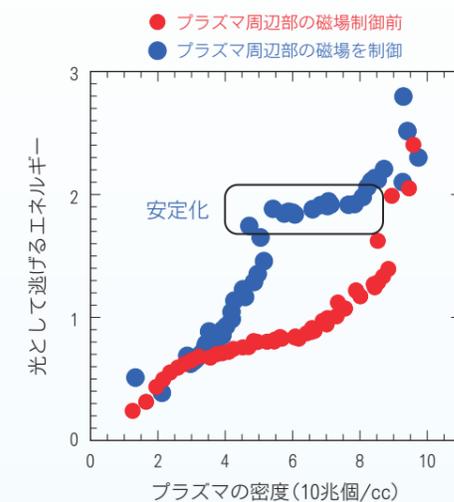


図3 プラズマの周辺部の密度を上げて、プラズマから壁に逃げるエネルギーをプラズマの周辺部で光に変えて逃がすことにより壁への熱負荷をほぼゼロにできる状態、プラズマ周辺部の磁場を制御することにより低いプラズマ密度から安定に作り出すことに成功しました(青丸、枠で示した領域)。縦軸の単位は百万ワット。

電子バーンシュタイン波を用いた高密度プラズマの加熱

吉村 泰夫・伊神 弘 恵

大型ヘリカル装置(LHD)では、磁場の中で電子が回転運動する性質を利用し、電子の回転運動の振動数と同じかその倍数の振動数の波動をプラズマに入射することでプラズマ中の電子を加熱することができます。これはブランコが揺れるのに合わせて繰り返し背中を押すことで揺れを大きくできることと同じです。電子加熱が起きる条件を満たす場所を電子サイクロトロン共鳴層(Electron Cyclotron Resonance: ECR層)といいます。ここでは、電子密度の非常に高いプラズマで電子加熱を実現するための電子バーンシュタイン波加熱について説明します。

プラズマ加熱によく使われる波動として異常波(eXtraordinary wave: X波、エックス波)があります。プラズマを家に、波動をそこに住む住人に例えます。X波はプラズマの密度が低い場合は簡単に家の中に入れてもらえて、家の中にあるECR層にも近付けるので加熱に使えます。しかしプラズマの電子密度が高くなると、玄関の扉を閉められてしまい家に入れてもらえなくなります。これは、電場が振動しているという

のがすなわち波動があるということなのですが、電子密度が高くなってくると、X波の電場の振動に電子の動きが追いついて電場を打ち消してしまい、X波を追い返してしまうためです。玄関の扉が閉まってしまふ時の電子密度を遮断密度といいます。

さて電子密度が高くて玄関の扉が閉まっているけれど家の中に入り込んで電子加熱をしたい。どうしたらいいかということで、元々家の中にいる波動を使おう、というのが最近の流行となっています。この波動は、発見者の名前を取って電子バーンシュタイン波(Electron Bernstein Wave: EB波)と呼ばれています。EB波はそもそも磁場のあるプラズマ中の電子が協調的に動くことで生まれます。これは高い密度のプラズマでも同じなので、EB波は密度が高くて追いつかれるとか家に居られないとかということがありません。それどころか、家の中でしか生きていけないのです。ここで重要なのが、EB波とX波は性格も生き方も全然違う(X波は波の進む方向と電場の変化の方向がほぼ垂直な横波ですが、EB波は

波の進む方向と電場の変化の方向が平行な縦波です)のですが、実は同じ母親(分散関係:波動が生きていける条件を表す式)から生まれた兄弟だということです。年齢を強引に波の山と山の間隔(波長)に例えると、生まれて間もない(波長が短い)時にはEB波とX波は見分けがつかないほどそっくりなのです。しかしX波はそのうちに年を取って波長が長くなりますが、EB波は家の中で生まれたあとは赤ちゃんの(波長が短い)まま過ごします。

プラズマの中には、X波が若返る(波長が短くなる)特別な場所があって、高域混成共鳴層と呼ばれます。X波が高域混成共鳴層にやってくると若返ってEB波と区別がつかなくなり、さらにはEB波となってプラズマを加熱することができます。高密度ではX波は普通には玄関を通過して家の中のECR層や高域混成共鳴層に近づくことができません。しかし、玄関の扉を強引に突き破る(fast X-B法: X波からEB波への変換)か、鍵の空いている裏口から忍び込む(slow X-B法)か、X波ではなくまた別の兄弟である正常波(Ordinary wave: O波、オー波)として、縁側の空いた窓から家の中に通してもらった後で、X波に変身することでX波を高域混成共鳴層に近づけ、EB波に変えることができます(O-X-B法)。玄関を突き破るやり方は条件が合わないためLHDでは使えません。以下では、最近LHDで行われているslow X-B法とO-X-B法による高密度のプラズマを加熱する実験について紹介します。

<slow X-B法>

X波が忍び込める裏口は、LHDの磁場を作るヘリカルコイルに近い、磁場強度の強い部分にあります。ヘリカルコイルの近くに新しい反射鏡を置くことで、その反射鏡で反射されたX波が磁場の強い側からプラズマ中に入って行くように工夫しました。高域混成共鳴層に到達したX波はモード変換によりEB波になった後プラズマ中を進み、プラズマを加熱します。2011年度に行われた第15サイクル実験ではX波の遮断密

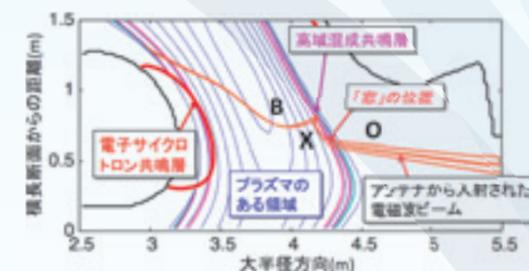


図2 LHDを上からの視線で見た場合の、赤道面から25cm下の水平断面図。プラズマから離れた位置から入射された電磁波(O波)が「窓」を通過してX波に、そしてEB波(図中のB)へと「変身」し、電子サイクロトロン共鳴層の近くまで伝わって行きます。青色の等高線はプラズマのある領域、水色の線はプラズマの外側からX波が近づいた場合に追い返される位置(遮断)を示しています。

度以上の高い密度のプラズマ中心領域での加熱(=温度上昇)を得ることができました(図1)ので、今後詳しくその実現条件を明らかにして行く予定です。

<O-X-B法>

「O波として縁側の空いた窓から家の中に通してもらった後で、X波に変身する方法(O-X-B法)」では、O波をこの「窓」に向けてアンテナから入射します。LHDではこの窓の幅が非常に小さいので、精度の良い入射方向制御が必要になります。図2は、LHDの弱磁場側にある水平ポートアンテナから入射されたO波が「窓」を通過した後でX波に「変身」し、さらにEB波に変わってプラズマ中を伝わり電子サイクロトロン共鳴層の近くで吸収される様子を示しています。第15サイクル実験では、プラズマ遮断密度を越える密度のプラズマにおいて、この「窓」に向けたO波の入射を行い、蓄積エネルギーと電子温度の上昇を確認しました。

電子バーンシュタイン波を用いたこれらの高密度プラズマ加熱実験を通し、将来の核融合炉で求められる高い密度でのプラズマ加熱の手法を確立するための研究をさらに進めていきます。

吉村泰夫 プラズマ加熱物理研究系 准教授
伊神弘恵 プラズマ加熱物理研究系 助教

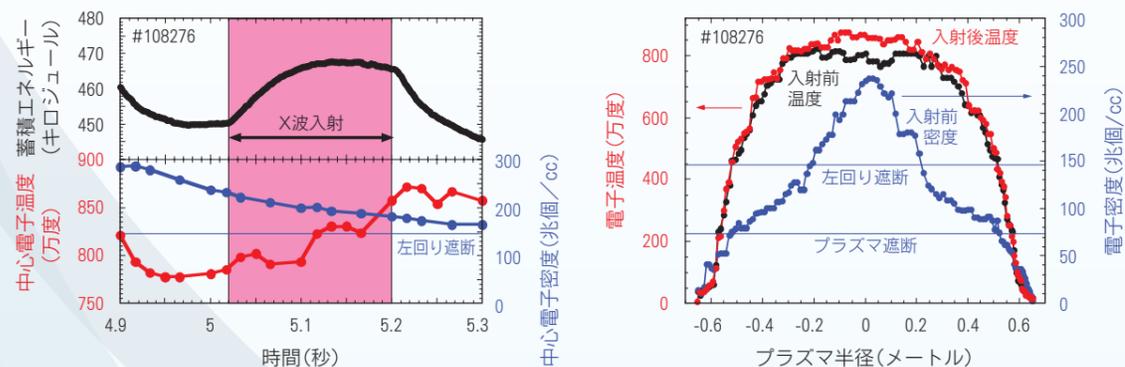


図1 左図は、slow X-B法を適用したプラズマ放電の基準時間から4.9~5.3秒の間の、プラズマに蓄積されたエネルギー(太い黒線)と、プラズマ中心部での電子温度(赤線)と電子密度(青線)の時間変化を示したものです。ピンク色で示された時間帯(X波を入射している間)に、X波の遮断密度(図中、左回り遮断と表示)を大きく超えるプラズマ中心部での電子温度に上昇が見られます。右図は、プラズマ中心(横軸0)からの電子温度(赤線と黒線)と電子密度(青線)の分布を示したものです。

MHD平衡と安定性に対する三次元磁場の効果に関する日米ワークショップ

渡邊清政

2012年3月5日から9日までの5日間にわたり、日米科学技術協力事業による電磁流体力学的(MHD)平衡と安定性に対する3次元磁場の効果に関するワークショップ(副題「トロイダルプラズマ制御の最適化に向けて」)が、国際トカマク物理活動(ITPA)のMHDと高エネルギー粒子に関する会合と合同で核融合科学研究所において開催されました。日米事業によるMHDワークショップは、10年以上前から場所を日米で交互に変えながら年に1回のペースで開催されており、日本での開催はほぼ2年ぶりとなります。MHDの平衡と安定性がプラズマ閉じ込めに与える影響の物理機構やその制御方法に着目した研究は、核融合炉実現のための不可欠な研究課題であり、世界中で精力的に行われています。一方、ITPAは、核融合プラズマ物理の進展につながる実験・理論研究成果に関する情報交換や装置間及び理論モデル・シミュレーションコード間の比較研究の推進に加えて、フランスで建設中の国際熱核融合実験炉(ITER)の設計・建設や運転に必要な物理研究成果の提供を目的とした国際的活動です。今回はその活動の中でMHD研究と、MHD不安定性と関係の深い高エネルギー粒子に関する会合が共催で開かれました。したがって、会議には日米からのみでなく、世界各国を代表するMHD及び高エネルギー粒子の専門家が約100名参加しました。この参加者数は、2年前に開催された時の約1.5倍に当たり、内訳は、日本44名、EU16名、米国

22名、ロシア4名、インド1名、韓国5名、中国4名、ITER機構5名です。会議は、小森彰夫所長と日米MHDワークショップの日本側の責任者である政宗貞男教授(京都工芸繊維大学)、ITPAのMHD、高エネルギー粒子分野の活動議長であるE.J. Strait博士(米国・ジェネラルアトミックス)、篠原孝司博士(日本原子力研究開発機構)の開催挨拶からはじまり、ほぼ毎日朝8時半から夕方6時まで、活発な発表と討論が行われました。前半の3日間は、参加者が一つの会場に集まり、共通の研究課題に関する発表や今回の日米MHDワークショップの重点課題であるプラズマを閉じ込める容器である磁場の3次元構造がプラズマのMHD平衡、安定特性に与える影響に関するパネル討論が行われました。磁場構造の三次元性の研究は、核融合科学研究所の大型ヘリカル装置における基本的な研究課題であり、実験、理論の両面から精力的に研究が進められている分野ですが、ITERをはじめとするトカマク型装置においても、外部に設置した三次元の摂動磁場コイルを用いた不安定性の制御法の研究など注目が集まっている分野となっています。一方、後半2日は、MHDと高エネルギー粒子分野に分かれて、特にITERに関連した個別の課題に関する研究発表と討論が行われ、5日間で有意義な情報交換や今後の指針が得られました。

(高密度プラズマ物理研究系 教授)



会議参加者の集合写真

「カールスルーエ工科大学滞在記」

高山定次

2011年8月末から2012年3月末までの7ヶ月間、カールスルーエ工科大学Karlsruhe Institute of Technology (KIT)に滞在しました。今回滞在了KITは、ドイツ南部のカールスルーエ市にあります。カールスルーエ市は、カールスルーエ城を中心に放射状に都市が構成されており、都市工学の研究分野でも注目されている街です。KITの南キャンパスはこのお城に隣接しており、私が滞在了北キャンパスは街から10kmほど離れた場所にあります。このKITは、Forchungszentrum Karlsruhe(学術研究所)とKarlsruhe University(TH)が統合し、新たにKITとして設立されました。この統合により、大型研究所と大学の新たな協力形態が推進されています。KITは、バーデン・ヴュルテンベルク州の州立大学であると同時にヘルムホルツ協会所属の大学外大型研究機関であり、大学の研究・教育機能と大型研究機関の最先端研究設備とを兼ね備えた国際的にもトップレベルの研究機関を目指しています。

KITでは、プラズマ加熱用のマイクロ波発振管(ジャイロトロン)の開発を行っているInstitute for Pulsed Power and Microwave Technology(IHM)に滞在了ました。このIHMでは、核融合用に開発された高出力ジャイロトロンの産業応用研究も積極的に行っています。滞在中は応用研究として、マイクロ波による製鉄実験を行い、マイクロ波効果の一つである周

波数効果の検証を行いました。また、将来の実用規模のマイクロ波製鉄炉では、高出力のマイクロ波発振器が必要となります。その候補の一つとして、ジャイロトロンが考えられています。そこで、30GHzジャイロトロンを用いて、マイクロ波製鉄実験を行い、将来への大型化に向けてその可能性試験を行いました。今回の一連の実験結果から、30GHzによるマイクロ波製鉄では、1000°C~1100°Cの温度領域で還元反応が進行し、Fe₃O₄からFeOを経由してFeまで還元されることが分かりました。一方、これまでの研究で用いた2.45GHzによるマイクロ波製鉄では、二段階の還元反応により、650°CでFeOまで還元され、その後の温度上昇に伴ってFeに還元されることが分かっています。このように、マイクロ波製鉄では周波数により、この還元反応の温度域の違いがあることが分かりました。

研究だけでなく、ドイツの「食文化」にもふれました。写真は、ハイデルベルグにハイキングに行った時のものです。研究所から貸し切りバスでハイデルベルグの北部にあるネッカーハウゼンの町まで行き、丘の上にあるお城でドイツの代表的なパンであるプレッツェルとビールでお昼ご飯を頂きました。その後、遊覧船でライン川を下りながらワインをいただき、ハイデルベルグでは、ビアレストランで食事を楽しみました。そして、帰りのバスの中でも、ワインをいただきながら、研究所に帰ってきました。研究仲間との楽しいひと時を過ごすとともに、朝から晩までビールとワインが欠かせないドイツの文化を知る良い機会となりました。

(装置工学・応用物理研究系 准教授)



お昼ご飯の場面



遊覧船の船上の場面

平成24年度科学技術分野の文部科学大臣表彰を受賞

当研究所の山田弘司研究総主幹、渡邊清政教授(高密度プラズマ物理研究系)、榊原悟准教授(同)が、「核融合炉に必要な高い圧力を持つプラズマの安定保持の研究」によって、平成24年度科学技術分野の文部科学大臣表彰科学技術賞研究部門を受賞しました。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、炉心となるプラズマの性能を高める必要があります。本研究では、大型ヘリカル装置(LHD)において、世界最高性能の高い圧力を持つプラズマを、安定して、定常に保持できることを示しました。今回の授賞は、核融合炉の早期実現に科学的な見通しを与えるものであると同時に、核融合炉の高い安全性と経済性の確立に寄与することが期待されると評価されたものです。

写真左から榊原准教授、山田研究総主幹、渡邊教授
(画像提供: 榊エンジニアリングニュース)



日本物理学会 第17回論文賞・第6回若手奨励賞・領域2学生優秀発表賞

平成24年3月24日から27日に関西学院大学で開催された第67回日本物理学会年次大会にて、『Causal Relationship between Zonal Flow and Turbulence in a Toroidal Plasma』(九州大学の藤澤彰英教授を第一著者とし、核融合科学研究所より、伊藤公孝教授、岡村昇一教授、井口春和准教授、磯部光孝准教授、井戸毅准教授、吉村泰夫准教授、秋山毅志助教、清水昭博助教、中野治久助教、永岡賢一助教、西村伸助教、小嶋護技術部計測技術課電子温度計測技術係長、松岡啓介名誉教授の所員14名が共著した論文)が第17回論文賞、永岡賢一助教が第6回若手奨励賞、総合研究大学院大学物理科学研究科核融合科学専攻博士後課程3年生のWang Haoさんが領域2学生優秀発表賞を受賞しました。

論文賞は、独創的な論文の発表により、物理学の進歩に重要な貢献をした研究者の功績をたたえるもので、毎年、物理学会全体で5編程度に贈られています。今回論文賞を受賞した本論文は、乱流と乱流が作る帯状流の結合を実証し、プラズマ乱流物理研究の新時代を切り拓いた重要な論文であると評価されました。

若手奨励賞は、将来の物理学を担う優秀な若手研究者の研究を奨励し、日本物理学会をより活性化するために設けられ、毎年、プラズマ領域(領域2)で2名程度に贈られています。今回の永岡氏の受賞は、プラズマの流れを計測する方向性プローブ法の開発とそれにより可能となったプラズマ中の散逸性渦構造の研究、及び、高速イオンの異常輸送の研究が高く評価されました。

領域2学生優秀発表賞は、物理学の発展に貢献しうる優秀な一般講演発表を行った学生を表彰するもので、今回が最初の表彰でした。Wangさんは、核融合科学研究所のプラズマシミュレータ(スーパーコンピュータ)を駆使した「高エネルギー粒子駆動型測地音響モードの非線形周波数掃引」の研究について発表が評価されました。

総研大核融合科学専攻より4名の学位授与者

平成24年3月23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、齋藤欣也さん、渡邊崇さん、村上昭義さん、夏目恭平さんの4名の学生が博士の学位を授与され、うち3名が学位授与式に出席しました。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。



写真 左から小森所長、齋藤さん、渡邊さん、村上さん、山田研究総主幹

平成24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いる方々を対象に、平成24年8月27日から31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、幅広い分野から課題を選択し、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できます。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。



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.205 (2012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。