

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.193



2010  
APR/MAY

特 集 …… 2 – 3

「研究部組織改編について」 小森 彰夫

研究最前線 …… 4 – 7

「LHD第13サイクル実験成果速報」 山田 弘司

「プラズマ乱流計測シミュレータ」 糟谷 直宏

トピックス …… 8

「平成22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)受賞」

「日本物理学会第4回若手奨励賞を受賞」

「総合研究大学院大学第1回学長賞を受賞」

「最終講義が行われました」

「プリンストン大学副学長が来訪」

「平成22年度総研大夏の体験入学のご案内」

## 研究部組織改編について

### 核融合科学研究所長 小森 彰夫

核融合科学研究所の大型ヘリカル装置(LHD)を用いた、高温高密度プラズマの生成・閉じ込め研究は、大学等と共同研究者、市民の皆様のご協力を得て、今後、十数年で所期の学術成果を達成できる見通しが立ってきました。また、理論シミュレーション研究では、数値炉を目指した研究が進められており、D-T燃焼実験を行わず原型炉を建設する研究計画を担保するものとして、期待されています。核融合研では、このような状況を踏まえ、30年以内に定常ヘリカル型核融合原型炉を建設し、実際に核融合発電を実証することを目指して、必要な学術研究の体系化を図る計画を進めています。この30年と言う年限は、1億度を超える高温、さらには核融合条件をはるかに超える1,200兆個/ccという高密度プラズマを実現している現在、昔の予測とは異なり、確度の高いものです。また、原型炉の工学設計と建設に15年程度が必要と考えると、工学基盤を構築し、工学実証研究を行う時間は、十数年しか残されておらず、瞬時とも言えます。

核融合研では、今後、超伝導導体、ブランケット、構造材等の工学分野における学術研究についても、大学等とともにその体系化を進める所存です。LHD実験、数値炉及び工学研究をそれぞれ大きく進展させるとともに、互いに成果を反映させることによって、定常ヘリカル型核融合原型炉を実現させるための学術研究を、効率よく成就することが可能となります。

核融合研では、上述のような計画を、今後、強力に推進するため、今年4月から研究組織を改編いたしました。従来の組織は、多くの研究部、センターに分かれており、専門的な研究を推進するのに適した研究体制と言えましたが、個々の成果を互いに協力して体系化するのには必ずしも適していませんでした。また、今後のLHD

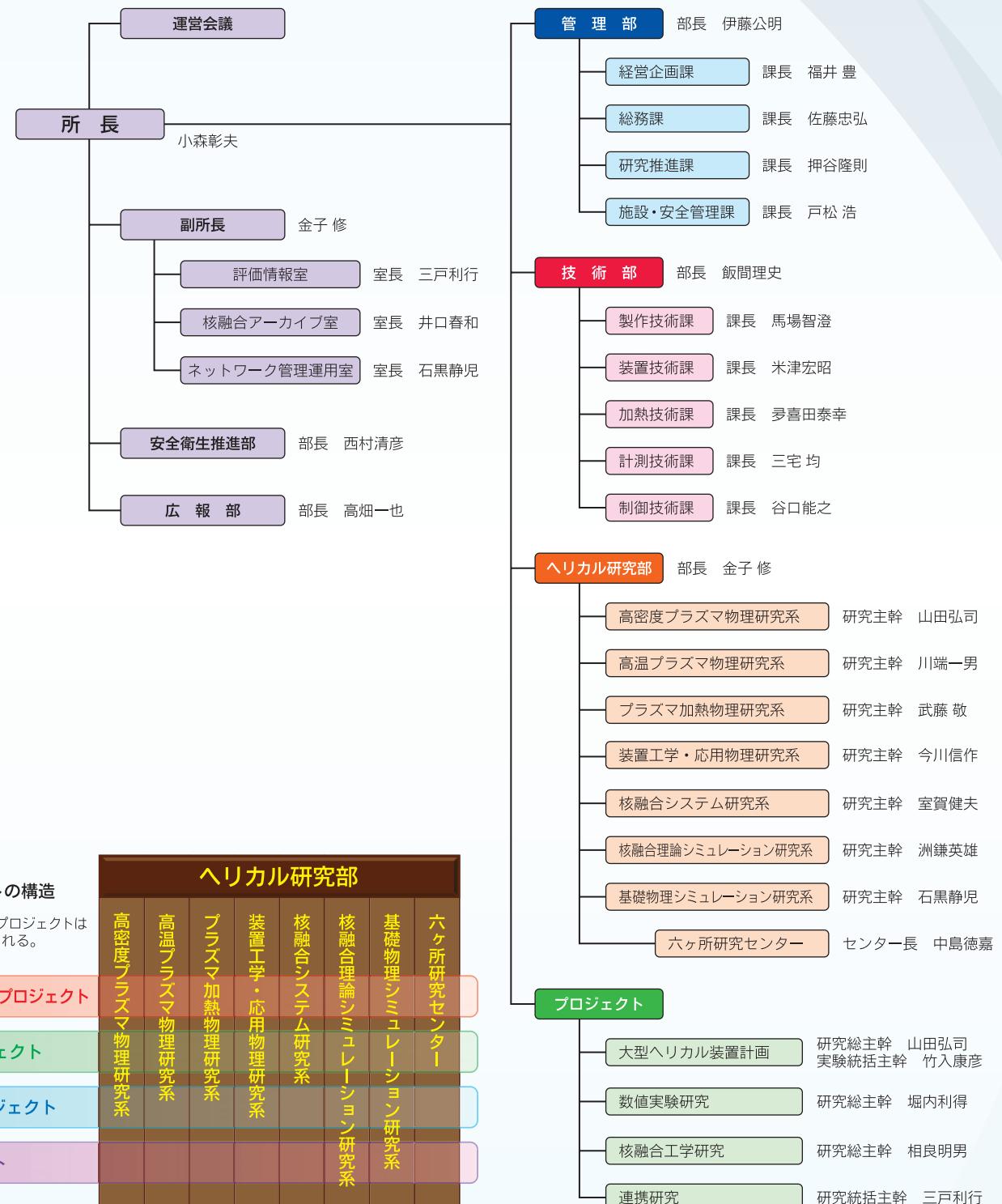
実験の飛躍的な展開、さらに、先に述べました、原型炉建設に向けた工学分野における学術研究の総合的推進等に対応するため、研究部、センターを一つの研究部に統合し、機動的に動ける研究体制としました。研究部は、専門が近い研究者から成る7つの研究系と六ヶ所研究センターで構成し、LHD実験、数値炉に向けた研究、工学研究及び連携研究は、プロジェクトとして、各系から研究者が参加することにより推進する所存です。研究系を縦糸に例えると、プロジェクトが横糸となり、しっかりした布(研究)が織れる(行える)と確信しています。また、この体制ですと、新規のプロジェクトを立ち上げるのも容易で、機動的に核融合研の研究を発展させていくことができます。とは言え、核融合研の研究成果は、個々の研究者の研究を積み上げたもの、体系化したものであり、個々の研究が核融合研の研究基盤を成し、研究体制はこれを促進する働きをするだけのものであることは申し上げるまでもありません。

最後になりますが、核融合科学研究所への更なるご指導とご鞭撻をどうぞよろしくお願い申し上げます。



### 組織図

平成22年4月1日現在



## LHD第13サイクル実験成果速報

山田 弘司

核融合エネルギーの実現を目指す学術研究を推進している本研究所では、大型ヘリカル装置 (Large Helical Device、以下略してLHDと呼びます)の第13サイクルプラズマ実験を昨年10月1日から開始し、同年12月24日に終了しました。LHDは世界最大規模のらせん(ヘリカル)状の超伝導コイルによって安定に高温のプラズマを閉じ込めることができます。第13サイクル実験においてはプラズマを約6,000回発生させ、大学等の研究者と、これらのプラズマを対象とした共同研究を進めました。

第13サイクル実験では大きな成果が二つありました。一つは、電子の温度が1億7,000万度に達する高温のプラズマを生成することに成功したこと、もう一つは、温度が上がるとともに燃料である水素以外の不純物がプラズマの外へ排除される現象について、原子番号が大きいほど吐き出し効果が大きくなる関係を見出したことです。この二つはいずれも将来の核融合発電炉に求められる重要な条件を満足させるものです。LHDはらせん状の電磁石を用いて高温のプラズマを閉じ込める磁場を定常に発生することができ、すでに1,000万度以上のプラズマを1時間保持することに成功しています。したがって、LHDによる実験計画では、現在、プラズマの温度を上げることに力を注ぎ、その性質を調べています。

では、この二つを詳しく、ご説明しましょう。

まず、電子温度1億7,000万度についてです。温度を上げるためにには加熱を増やすことと、プラズマから熱が逃げないように断熱することの両方が必要です。片方だけですとうまくいきません。プラズマは電離した気体であり、電子とイオンからなっています。これらの性質を利用

した固有の加熱方法があります。筑波大学と共に、電子を加熱する手段である電子サイクロトロン共鳴加熱を行う装置の研究開発を進め、3,000キロワットを超える加熱電力をLHDの実験に用いることができるようになりました。具体的には77ギガヘルツの周波数を持つマイクロ波を発生するジャイロトロンと呼ばれる装置です。ちなみに、ご家庭にある電子レンジもマイクロ波を使っていますが、この周波数は2.45ギガヘルツです。さて、このマイクロ波をプラズマに入射すると、磁場中の電子の回転運動と共に鳴り、電子を加熱します。この大電力マイクロ波加熱を、これまでの実験研究で明らかになったプラズマから熱が逃げにくい閉じ込め磁場に組み合わせることによって、図1にあるようにプラズマの中心の電子温度を1億7,000万度にまで上げることに成功しました。これまでの最高記録である1億2,000万度を大きく更新したことになります。核融合反応は温度のほぼ2乗に比例して起こりやすくなります。したがって、

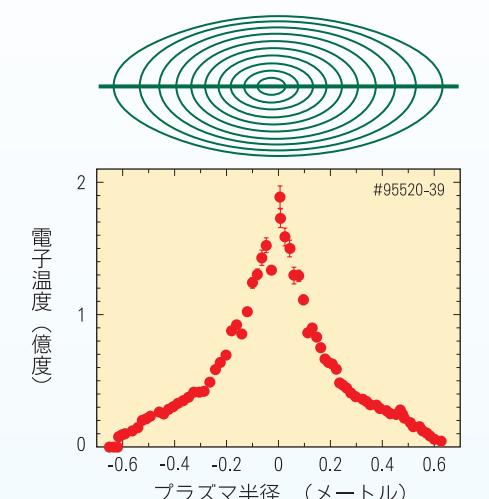


図1 プラズマの断面（上図）の水平軸に沿って測定した電子の温度分布（下図）。

より好ましい高い温度条件でも、これまでの考え方でうまくいくことを証明することができました。

つぎに、不純物の排除についてです。平成20年度の実験で、温度の高いプラズマ中心部では、不純物として炭素の小粒を意図的にプラズマ中へ入射しても、イオン温度の上昇に伴って自動的にこの炭素が排除されるという現象を発見していました。平成21年度には、炭素以外の元素(ヘリウムとネオン)を注入することにより、この現象を詳細に調べました。その結果、原子番号が大きくなるほど、この排除の効果が強まるという関係を見出しました。図2はヘリウム(原子番号2)、炭素(同6)、ネオン(同10)のプラズマ中の割合の分布を示したもので、主たる燃料の水素に対し、中心部ではヘリウムは2%、炭素は0.3%程度、ネオンは0.03%程度になっています。不純物の割合自体が原子番号とともに大きく減少し、また、その分布が外側へ寄っていることに注目してください。図3はドーナツ形状のプラズマを斜め方向から見た画像で、(a)は可視光、(b)、(c)はX線です。X線は不純物からの放射によるものですが、温度が上がると、(b)か

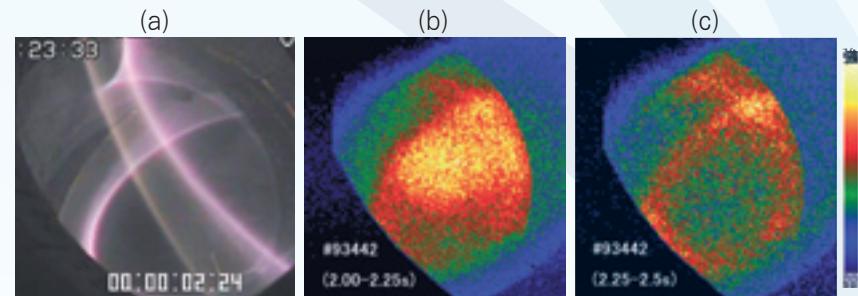


図3 プラズマをドーナツ形状に接する方向から見た画像。  
(a)可視画像。(b)、(c)X線画像（色はX線の強度）。X線は不純物からの放射によるものです。温度が上がると、(b)から(c)に変化し、不純物が外に排除されていることが分かります。

ら(c)に変化し、ここでも不純物が外に排除されていることが分かります。将来の核融合発電炉では、水素の同位体がヘリウムに変わる核融合反応を利用します。また、プラズマ中には水素以外の元素(炭素、酸素、金属など)が壁からどうしてもいくらかは混入します。これらのヘリウムや不純物は水素燃料の純度の低下をもたらすとともに、原子は原子番号が大きいほど高温になるとより強い光を出してプラズマを冷やします。目安として、燃料水素に対して、ヘリウムは5%程度、炭素は1%程度、金属は0.01%(1万分の1)程度に抑える必要があります。LHDの実験結果はヘリウムと炭素については既に条件を満たしており、金属については代表的な鉄の原子番号が26ですから、確認された原子番号との関係(法則)から十分に抑えることができると予測ができます。この成果はLHDにおいて、プラズマの温度をさらに向上させる上でも、明るい見通しを与えるものであり、将来の核融合発電炉において、極めて好ましい性質の発見です。

この他にも超高密度の定常保持や磁場の乱れの影響の理解など、数多くの成果を上げることができます。これらの成果をさらに深く理解するための解析を進めるとともに、さらなる成果につなげるべく、今年の10月6日からの第14サイクル実験に向けて、現在、準備を進めています。最後に、この場をお借りして、LHD運転グループによる円滑な運転遂行に謝意を表し、広くLHD実験にご理解とご支援をくださった方々へ御礼申し上げます。

（大型ヘリカル装置計画 研究総主幹）

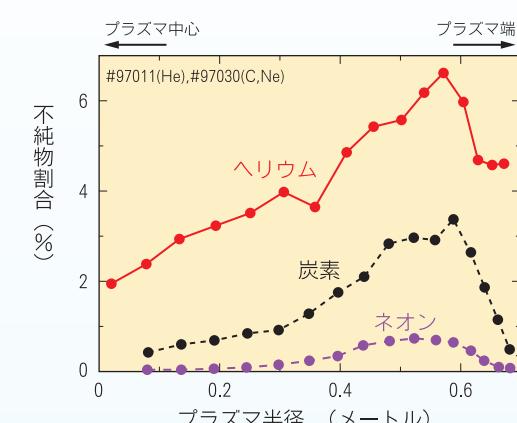


図2 プラズマ中の不純物割合の分布。左端がプラズマの中心、右端がプラズマの端です。原子番号が2のヘリウムから、6の炭素、10のネオンと大きくなるにつれて、外側へ排除される効果が強まります。

## プラズマ乱流計測シミュレータ

糟 谷 直 宏

核融合プラズマは多くの渦が入り乱れた乱流という状態にあります。面白いことにプラズマは乱れながらも構造を作ります。例えばある方向に長く伸びた渦や短い距離で流れの方向を変えるパターンで、「乱流構造」と呼ばれます。近年この乱流構造がプラズマの熱や粒子の輸送にもたらす効果が重要であるとわかり、世界的に研究が進められています。理論の進展とともに、実験でも高い精度の計測器が開発されたことにより、プラズマの状態が明らかになってきています。本稿ではその理論と実験の研究の橋渡しを担うべく、現在開発を進めている「乱流計測シミュレータ」について紹介します。

プラズマ中では多くの粒子が互いに力を及ぼしあっています。その振る舞いをモデル化して、計算機シミュレーションで予想することで、複雑な現象を理解することができます。近年の計算機性能の向上から、多くのデータ数を持つ計算が可能になりました。そのような空間3次元

の時間変化のデータに対して、実験計測を模擬した操作を行うのが乱流計測シミュレータです。解析の手順は以下の通りです。まず、プラズマを流体として扱うモデルを用いてプラズマの圧力、電位などの時間変化をスーパーコンピュータで計算します。得られたデータを時刻ごとに3次元空間の全領域にわたって大容量ハードディスクへ保存し、解析します。解析には多くの時刻についてのデータが必要となり、全データはひとつのプラズマ条件に対して数テラバイトの大きさとなります。解析は手元のコンピュータで行います。実験でいうプラズマを作る装置がスーパーコンピュータで、プラズマを測る機器がコンピュータにあたるといえます。様々な計測法を模擬してデータを数値化し、シミュレーションで得られている乱流構造が実際の実験ではどのように見えるのか実験計測への指針を示します。

ここで乱流構造の解析例を示します。乱流構造が形成されるときの特徴を明らかにするために、図1(a)のような軸方向に磁場がかけられた円筒形プラズマで、密度の勾配によって駆動される不安定性のシミュレーションを行いました。そして不安定なモードの結合から帶状流や半径方向に伸びた強い渦(ストリーマ)といった乱流構造の形成を得ました。図1(b)にストリーマの断面図を示します。強い渦が方位角方向に局

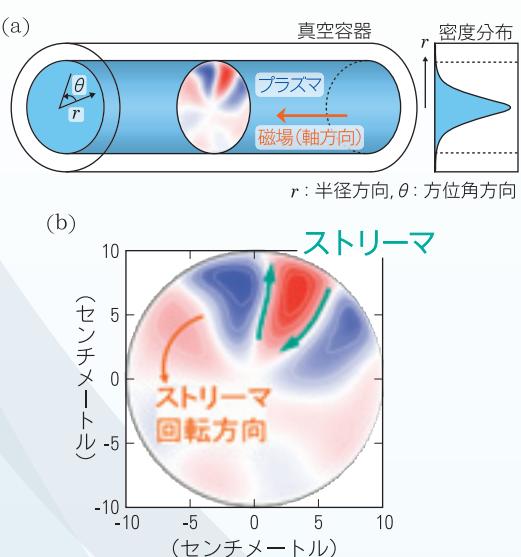


図1 (a)円筒形プラズマの模式図。軸方向に磁場がかけられています。(b)シミュレーションで得られた、円筒断面上での電位分布。半径方向に伸びた強い渦(ストリーマ)が形を保ちながら回転します。

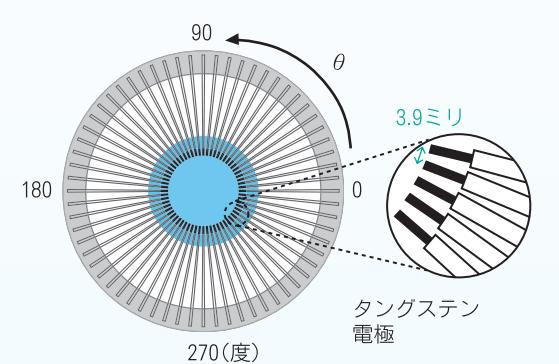


図2 LMD-U装置に備えられた方位角方向に並んだ64個の探針列

在しており、形を保ったままこの場合は反時計回りに回転します。このストリーマの存在は理論的に予想されていましたが、実験での明確な観測はありませんでした。そこでシミュレーションで得られた構造が、実験ではどのように観測されるべきかを検討しました。九州大学のLMD-U装置は円筒形のプラズマを生成し、磁化プラズマの物理的な特性を研究する実験装置です。プラズマ中に挿入することで密度や電位を測定できる探針を多数備えており、詳細なプラズマ分布計測ができます。図2のような64個の探針列により方位角方向の密度分布の測定を行う場合を考えます。シミュレーションデータ上でこの測定を模擬するとストリーマは図3(a)のように見えます。LMD-U装置で測定した結果が図3(b)で、特徴的なパターンの存在からストリーマが形成されていることがわかります。このように、乱流計測シミュレータによる予測が世界初のストリーマの実験観測につながりました。

核融合科学研究所の大型ヘリカル装置(LHD)のようなヘリカルプラズマの解析も進めています。磁場の曲率や圧力の勾配によって駆動される不安定性について乱流シミュレーションを行いました。そしてそのデータに対してLHDで密度や電位などのゆらぎの計測に威力を発揮している計測器を模擬した解析を行っています。

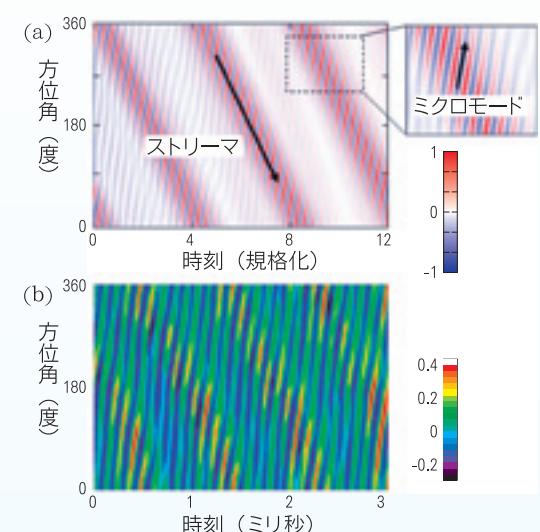


図3 ストリーマを方位角方向の探針列で観測した時の密度揺らぎ分布の時間変化。(a)がシミュレーション、(b)が実験観測の結果です。

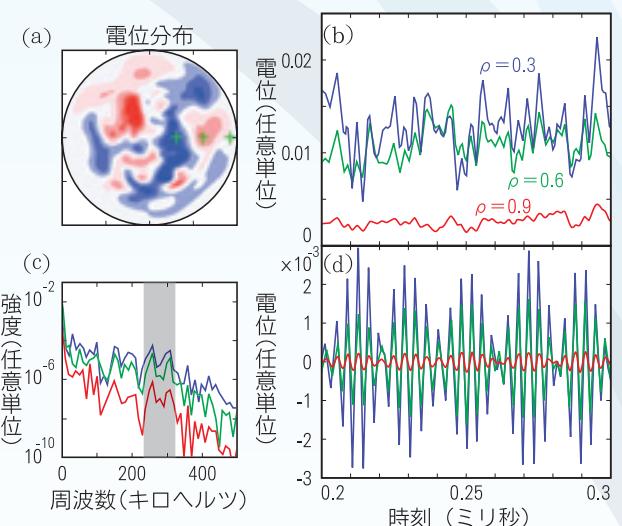


図4 電位揺らぎ(a)とその異なる半径位置3点((a)上に十字で示された点、 $\rho$ は規格化小半径)での時間変化(b)、および周波数スペクトル(c)。図(c)のグレー領域のゆらぎを取り出したものが(d)です。

図4にシミュレーションデータの解析例として、一見ばらばらな時間変化のデータから隠れたモードを検出する方法を示します。図4(a)の断面図にあるような電位ゆらぎに対して異なる半径位置3点での電位の信号を取り出します(図4(b))。これだけではそれぞれに関係があるのかわかりません。そこで周波数を分解し、領域を区切って各成分を取り出して比較します。すると図4(c)のグレー部分の成分は図4(d)のように強度変化が同期しており、半径方向に広がった構造が存在することがわかります。この周波数帯に存在する複数のモードが結合して同期をもたらしています。シミュレーションデータからはこのように特徴的なパターンをきれいに抜き出すことができ、その観測の仕方を検討できます。重イオンビームプローブでは電位分布を高い時間分解能で測定できるので、上記の解析が適用できます。

以上、乱流シミュレーションと実験計測を比較することで乱流構造の形成機構を研究する乱流計測シミュレータについて述べました。今後は実際の装置の磁場配位を反映したシミュレーションによる実験との比較やエネルギー伝達の定量的な評価により乱流構造の形成が熱や粒子の輸送へもたらす効果の解明につなげていきたいと考えています。

(核融合理論シミュレーション研究系 助教)

# TOPICS トピックス

## 平成22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)受賞

当研究所ヘリカル研究部の居田克巳(写真左)教授が、「磁場閉じ込めプラズマにおける回転流の発見と炉心改善の研究」に関する業績により、平成22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。核融合発電を目指した磁場閉じ込めプラズマにおいては、より小型の装置でより高い炉心性能を得る事が経済性の観点から求められています。居田教授は、独自に開発した最先端の計測器によりプラズマ中に発生する回転流を観測し、特徴あるプラズマ中の流れ(帯状及び自発回転流)を発見しました。さらに、これらの流れがプラズマの炉心の性能を上げる効果があることを見出し、核融合発電の早期実現に寄与する成果として高く評価されました。



## 総合研究大学院大学第1回学長賞を受賞

核融合科学研究所で研究をしている総合研究大学院大学核融合科学専攻の5年一貫制博士課程5年生の大島智子さんと仲田資季さんが、総合研究大学院大学第1回学長賞を受賞しました。受賞式は、2010年4月8日の総合研究大学院大学入学式に行われ、新しく入学する大学院生の前で高畠尚之学長から賞状が手渡されました。大島智子さんは、室賀健夫教授指導の下、『核融合炉液体ブランケット中の水素及び水素同位体のオンライン測定』という研究の内容に取り組み、その研究成果が評価されて受賞しました。仲田資季さんは、渡邊智彦教授指導の下、『電子温度勾配乱流における渦構造と輸送のジャイロ運動論による解析』という研究の内容に取り組み、その研究成果が評価されて受賞しました。



左から大島さん、小森所長、仲田さん

小森彰夫所長(総研大核融合科学専攻長)から、受賞者の2人にむけて更に学業に精進するようにとの激励がありました。

## プリンストン大学副学長が来訪

自然科学研究機構とプリンストン大学間での学術交流協定が今年3月に締結されたことにともない、プリンストン大学副学長のA.J.ステュワート・スミス教授(写真中央)が自然科学研究機構の各研究機関を視察し、3月12日には核融合科学研究所を訪れました。

スミス副学長は小森彰夫所長とともに核融合研究の現状や課題について議論し、その後の施設見学では、大型ヘリカル装置や最新の実験機器などを熱心に見学し、説明に耳を傾けていました。



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.193** (2010年4,5月号)

〒509-5292 土岐市下石町322-6 TEL: 0572-58-2222 (代表)  
<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。

## 日本物理学会第4回若手奨励賞を受賞

核融合理論シミュレーション研究系の槽谷直宏助教が、「磁化プラズマにおける乱流輸送の2次元構造の研究」に関する業績で、日本物理学会第4回若手奨励賞を受賞しました。この研究では、トロイダルプラズマで形成されるHモード輸送障壁内の電場構造が強い径電場とともにボロイダル不均一を含む2次元的な構造を持つことを示し、また、円筒形プラズマでの乱流シミュレーションを通じて粒子輸送の大きさに影響する乱流構造の形成機構と選択則を明らかにしました。この乱流構造形成についての研究成果は、九州大学の実験グループによるプラズマ中の構造の同定に貢献し、高く評価されています。研究内容を本号「研究最前線」で紹介していますのでご覧ください。



## 最終講義が行われました

平成22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15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)



佐藤國憲准教授  
(高温プラズマ物理研究系)  
「分光屋として楽しかった実験の数々」

松岡啓介教授  
(連携研究推進センター)  
「研究生活からの温故知新」

大藪修義教授  
(理論・データ解析研究系・  
研究主幹)  
「X点をキーワードとして」

## 平成22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、プラズマ理工学及び核融合工学に関連した研究を体験していただくことを目的として、平成22年8月23日から27日まで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、スーパーコンピューターによるプラズマ・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、教員及び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。夏の体験入学の実施詳細は、核融合科学専攻HP(<http://soken.nifs.ac.jp/>)をご覧ください。

## 《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。