

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.201



安全で クリーンな 未来の エネルギー
「核融合」

一般公開
入場無料

2011 日
10/29
9:30-16:00
（受付入場は 15:30）

イベント 公開講座（一般/小学生向け）

- ★大型ヘリウム気球
（JAEAの核融合実験）
- ★宇宙ミッドウェー橋
- ★光時計
- ★ロボット工作
- ★バーチャル体験
- ★科学工作教室 など

「私たちの生活と
これからのエネルギー」

「楽しく学ぼう、てんきの作り方講座」

※10/29
NIFS杯 少年サッカー交流大会

※10/29
NIFS杯 少年サッカー交流大会

2011
AUG/SEP

研究最前線 …… 2-5

水素の氷粒をプラズマへ～固体水素ペレット入射とその溶飛イメージング計測～ 本島 巖
第3の燃料供給手法:超音速ガスパフ(スーパーソニックガスパフ:SSGP) 村上 昭義
宮澤 順一

特 集 …… 6-7

総研大・核融合科学専攻「夏の体験入学」 長坂 琢也

トピックス …… 8

平成23年度オープンキャンパス(一般公開)のご案内
第21回国際土岐コンファレンスのお知らせ
市民学術講演会を開催しました
市民説明会を開催しました

水素の氷粒をプラズマへ ～固体水素ペレット入射とその溶発イメージング計測～

本 島 巖

将来の核融合炉では、核融合反応によるプラズマ自身の燃焼により、外部からの加熱入力無しで高温プラズマ状態を維持することができます。その間、水素燃料は核融合反応によって減少していくため、核融合プラズマを定常に維持するためには外部から継続的に燃料を供給する必要があります。言うなれば、ガスコンロの火を灯すためにはガスを供給する必要があることと同じです。その有効な供給法のひとつに固体水素ペレット入射法があります。一般的に、ペレットは『小さな粒』という意味で用いられますが、その意味のとおり、水素を摂氏マイナス263度まで冷やして作った固体水素の氷粒(直径数ミリメートル)を秒速1000メートル以上の速度でプラズマに入射します。なお、音の速度は秒速340メートルなので、音速よりも3倍近く速い入射速度です。ペレットは1億度を超える高温のプラズマによってあっという間に(1000分の1秒程度)溶発してガスになり、プラズマの燃料となります。しかしながら、ペレットは溶発しながらもプラズマ中を高速で飛んでゆくのプラズマ内部まで効率よく水素燃料を供給できます。これが、ペレット入射法の最大の特長と言えます。

図1(a)は大型ヘリカル装置(LHD)で用いられている固体水素ペレット入射装置を示しています。小型冷凍機を用いて細い管の中にペレ

ットを作り、その管の一方に高圧のヘリウムガス(1気圧の30-40倍程度)を詰めて高速バルブを開き、ペレットを一気に加速します。加速の原理は吹き矢を想像していただくと分かりやすいと思います(図1(b))。最近、ペレット入射装置はアップグレードされ、以前より2倍の個数のペレットを入射することができるようになりました。

さて、ペレットはどのように溶発し、どのようにプラズマに吸収されるのでしょうか?この疑問に答えることが、燃料供給法を確立するために極めて重要です。ペレットは溶発する際、ペレットの周りに弱電離した高密度プラズマ塊(プラズモイド)を形成します。プラズモイドは散逸して、最終的にプラズマに吸収されるのですが、その振る舞いは、プラズマとの相互作用を受けて大変複雑です。このプラズモイドの挙動を理解、さらには正確に予測することができれば、将来の核融合炉における燃焼制御や燃料供給効率の向上を可能にすることができます。

プラズモイドは磁力線に沿って長細く伸びながら、光を発していることが観測されています(図2(a))。実はこのプラズモイド、高温プラズマが発する光の数倍強い光を放ちながら進んでいます。私たちは、プラズモイドから発せられた光からプラズモイドの内部情報(電子温度、電子密度)を得るためのイメージング計測手法を

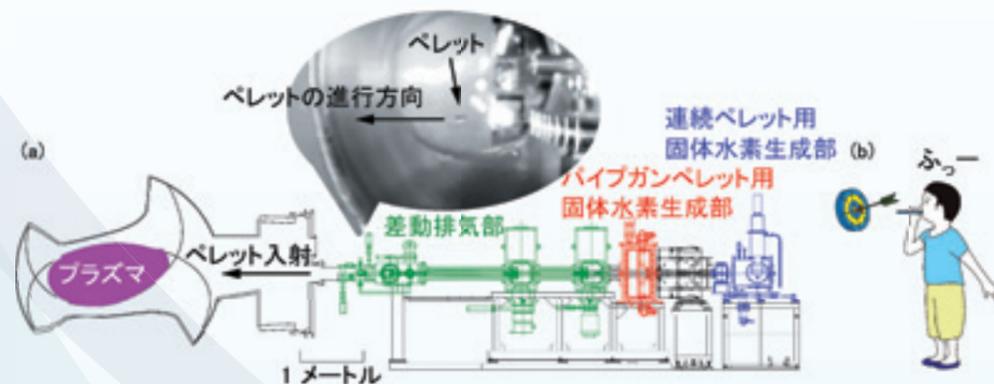


図1 図1(a)LHDに設置している固体水素ペレット入射装置とペレットの画像。二種類のペレット入射装置が集約されています。(b)ペレットの加速は吹き矢と同じ原理を利用しています。

開発してきました。この計測により得られたプラズモイドの基本的なパラメータは、ペレットの溶発過程におけるプラズモイドの挙動を理解・予測するために決定的な情報となります。

本計測では、分岐されたイメージファイバと高速度カメラを用いて観測を行っています。イメージファイバは医療用内視鏡等にも用いられており、7万5000本もの光ファイバを束ねたもので、プラズモイドの詳しい空間分布を得ることができます。また、高速度カメラは毎秒最大10万枚もの画像を得ることができます(一般的に、デジタルカメラの動画で得られる画像は、せいぜい毎秒数10枚です)。高速度カメラは例えば、野球の試合等でスローモーション映像を撮るために用いられていますが、ペレットの溶発等、速い時間スケールの物理現象を観測する上でも駆使されています。プラズモイドの光は対物レンズの付いたイメージファイバで観測され、最終的に1台の高速度カメラに結像されます。各ファイバには異なる狭帯域光学フィルタが装着されています。狭帯域光学フィルタとは、ある波長の光だけを透過するフィルタのことを言います。

プラズモイドの光のスペクトル(図2(b))は、プラズモイドの電子密度、電子温度に依存しています。例えば、図2(c)に電子密度の異なる条件における、ある波長領域のプラズモイドの光のスペクトルを示しています。電子密度が高い場合は、スペクトルの裾野がより広がっている

ことが分かります。透過幅の広い狭帯域光学フィルタと狭い狭帯域光学フィルタを用いし、それらを通してプラズモイド光の強度を見てみます。すると、電子密度が低いとき、スペクトルはピークしているもので、いずれのフィルタでも得られる光の強度は同等です。一方で、電子密度が高いときは、スペクトルの裾野が広がっている分だけ透過幅の広いフィルタの方が得られる光の強度は大きくなります。すなわち、各フィルタで得られた光の強度(図2(a))を比較することにより、光のスペクトルを再構築することができ、プラズモイドの電子密度分布、電子温度分布を求めることができるわけです。図3に典型的なプラズモイド内の電子温度、電子密度のイメージング結果を示しています。プラズモイドの中には、温度が約1万度、密度が10京個/ccのオーダの電子が分布しており、この時のターゲットとなるプラズマ本体の密度は中心で20兆個/ccですから、プラズモイドの密度は約5000倍も高いことが分かりました。また、プラズマの温度によって、プラズモイド内の電子密度分布が異なっていることも分かってきました。今後、様々なプラズマ条件下に入射されたプラズモイドの内部分布を調べ、ペレット溶発の素過程の理解に迫りたいと考えています。また、本計測手法は海外の核融合実験装置でも興味を持たれ、海外の研究機関との共同研究がスタートしています。(高密度プラズマ物理研究系 助教)

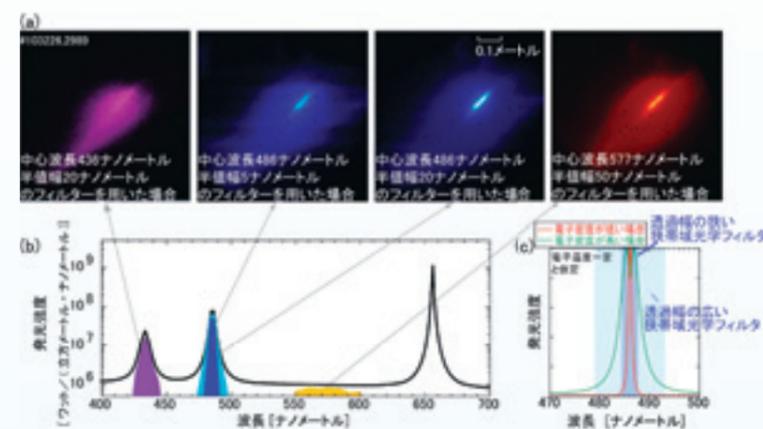


図2 (a)典型的なプラズモイドの発光画像。同じプラズモイドを異なる狭帯域光学フィルタを通して観測しています。各画像で発光強度が異なっており、これらの画像の強度を比較することにより、プラズモイドの内部情報を得ることができます。(b)プラズモイドの発光スペクトル例。スペクトルに複数のピーク(バルマー系列と言います)が存在していることが分かります。(c)異なる電子密度条件下におけるプラズモイドの発光スペクトル(波長領域を470-500ナノメートルに拡大)。緑線は電子密度が高い場合、赤線は電子密度が低い場合のスペクトルを示しています。プラズモイドの光のスペクトルはプラズモイドの電子密度、電子温度に依存します。

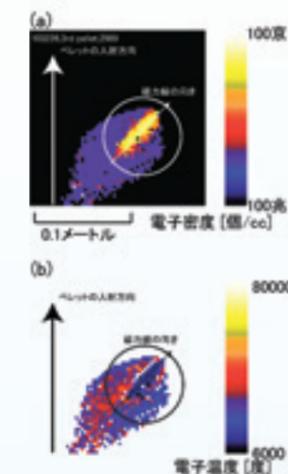


図3 プラズモイドのイメージング結果を示しています。(a)は電子密度イメージング、(b)は電子温度イメージングです。なお、電子密度は対数スケールで表しています。○で囲まれた部分にプラズモイドのイメージングが示されています。

第3の燃料供給手法：超音速ガスパフ (スーパーソニックガスパフ：SSGP)

村上昭義・宮澤順一

プラズマに燃料水素を供給する手法は、大きく分けて以下の2つの手法がこれまでにありました。

1つは、ガスパフと呼ばれるもので、真空容器内に燃料ガスを噴出するものです。この手法は、もっとも簡便な手法でこれまで多くのプラズマ発生装置に使用されてきました。しかし、将来の核融合炉を模擬できるような高温のプラズマにおいては、従来のガスパフではプラズマの密度を上げるのに限界があることがわかってきました。

これを補う手法として、ペレット入射と呼ばれるもう1つの手法があります(この話の前に掲載されています)。この手法の場合、プラズマ中心部に直接、粒子を供給できるため、供給効率に優れています。本研究所の大型ヘリカル装置では、このペレット入射によって中心部に急峻な密度分布をもつ超高密度のプラズマが生成されています。一方、このペレット入射には、マイナス263℃という極低温や高速で射出するための設備が必要で、固体水素の塊がプラズマになる過程で、プラズマの温度を大きく下げてしまいます。

そこで、これら2つの手法の中間的な特性を持つ新たな燃料供給手法として超音速ガスパフと呼ばれる手法を開発し、核融合炉における粒

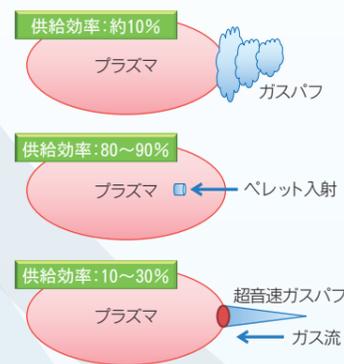


図1 ガスパフ、ペレット、超音速ガスパフそれぞれの場合における燃料供給のイメージ図と供給効率の目安。

子供給に応用しようと考えています。(図1に3種類の供給イメージを示します。)この手法は、単位時間あたりにプラズマへ供給する粒子の数が従来のガスパフより多く、パルス状にガスを連続入射することができます。従来のガスパフより10倍から20倍程度の高い圧力のガスを、超音速ノズル(ラバールノズル)を介して噴出し、収束性の高いガス流をプラズマへ供給します(図2参照)。

超音速ガスパフに使用されているソレノイドバルブは、従来のガスパフで使用されているピエゾバルブより、20倍程度の耐圧があり、時間応答特性に優れています。超音速ノズルは、ロケットや航空機のエンジンなどに使用されていますが、ばらばらになっている気体の流れを整え、音速よりも速い超音速の流れを作るものです。超音速ガスパフは、これらの組み合わせで、超音速ガス流を発生させプラズマ周辺部の密度制御性を向上させました。

ペレット、超音速ガスパフ、従来のガスパフの



図2 超音速ガス流を発生させるソレノイドバルブと超音速ノズルの断面図と実際の写真。

それぞれの場合における平均のプラズマ密度の時間発展を図3(a)に示します。0秒でそれぞれの手法を用いた入射が行われていますが、超音速ガスパフの密度の到達値は、ペレットとガスパフの間であることがわかります。密度の上昇の仕方に注目してみても、ペレットが1番急峻な上昇を示し、従来のガスパフがゆっくりとした密度上昇を示していますが、超音速ガスパフは、両者の中間の上昇の仕方を示しています。ペレットのようにプラズマ中心部に粒子を供給しているわけでない超音速ガスパフが、なぜペレットと従来のガスパフの中間の性質を示すのでしょうか。それは、超音速ガスパフによって供給された粒子が拡散によってプラズマの中へ運ばれる量がガスパフより多いことに起因します。プラズマに入射されたガスは、すぐに電離し、そこでの密度を増加させます。超音速ガスパフは、その特長によって、周辺部の密度をガスパフより大きく上昇させます。図3(b)に密度分布の時間変化を示します。横軸の規格化小半径は、0がプラズマ中心部で1がプラズマの端を表します。①入射前は低い密度でしたが、超音速ガスパフが入射されて②35ミリ秒では、周辺部の密度が大きく上昇しているのがわかります。プラズマとなった粒子は、密度の高いところから低いところへ流れるように内側の密度を増加させます。水桶に熱湯を入れると、しばらくして温度が一定になりますが、それは、熱湯

の温度が全体に拡散されるためです。それと同じように、プラズマの周辺部に供給された密度の高い粒子が、拡散によって中心部に供給されていきます。その後、プラズマ全体の密度が均一化していることが入射③135ミリ秒後の分布からわかります。このようにして、超音速ガスパフは、従来のガスパフより供給効率を高くできる特性があるのです。

上記の供給特性の他に、超音速ガスパフは高い繰り返し頻度で粒子を供給することができます。最大で500ヘルツ(1秒間に500回)の繰り返しで入射できることがテストでわかりました。この特長を使ってプラズマに密度の揺動を起こす実験も行っています。パルス幅1ミリ秒を50ヘルツで入射した実験では、周辺部の密度が入射周期に対応して変動することを観測できました(図4参照)。このような密度揺動を励起することで、プラズマ中に存在する揺動を制御することなどを目的としたプラズマ物理の深い理解に関わる実験にも使用されています。

村上昭義: 総合研究大学院大学
物理科学研究科 核融合科学専攻
5年一貫制博士課程5年
日本学術振興会特別研究員
宮澤順一: 核融合システム研究系 准教授
総合研究大学院大学
物理科学研究科 核融合科学専攻/併任

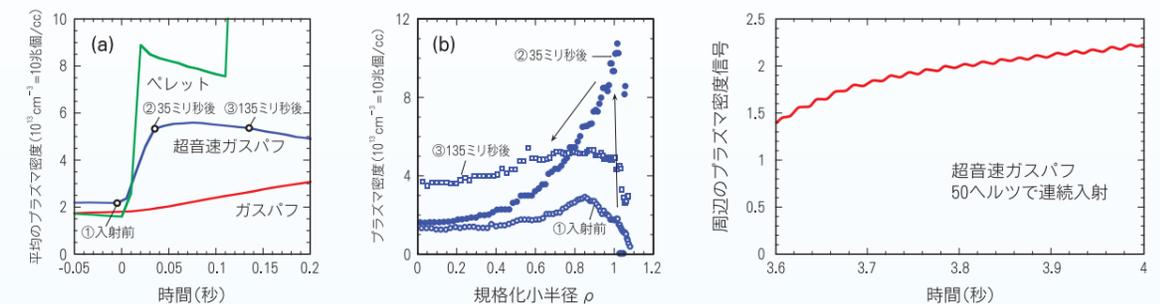


図3 (a)は平均のプラズマ密度の時間発展を示します。ペレット(緑)、超音速ガスパフ(青)、ガスパフ(赤)が時刻0秒からそれぞれ入射されています。このとき超音速ガスパフのガス圧は50気圧でパルス幅は30ミリ秒(ms)です。(b)は超音速ガスパフ入射時のプラズマ密度分布の変化を示します。(a)の超音速ガスパフの放電をプラズマの規格化小半径として分布で示しています。①(○)は超音速ガスパフの入射前の密度分布を、②(●)は超音速ガスパフが入射されてから35ミリ秒(ms)後の密度分布を、③(□)は入射後135ミリ秒(ms)後を示し、②の密度がプラズマ全体に拡散された分布を示しています。

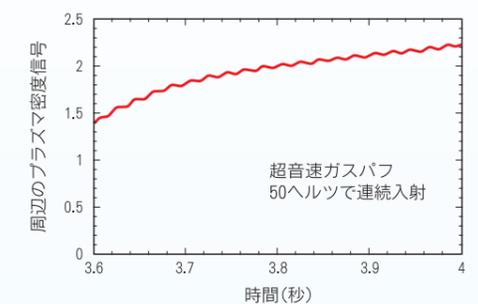


図4 超音速ガスパフを50ヘルツ(Hz)で連続入射したときの、周辺のプラズマ密度信号を示します。

総研大・核融合科学専攻「夏の体験入学」

長坂琢也

核融合科学研究所(以下「核融合研」)内には、総合研究大学院大学(以下「総研大」)・物理科学研究科・核融合科学専攻が設置されています。総研大とは、大学共同利用機関(核融合研もその一つ)ならではの優れた研究環境と人材を活用して、トップクラスの研究者を養成することを目的とした大学院です。核融合科学は、プラズマ工学、原子物理学、電磁気学、機械工学、超伝導工学、材料工学、真空工学、シミュレーション科学など、様々な分野にまたがるので、どのような分野の学生でも受け入れ可能であり、その道のエキスパートが教員となって、世界最先端で活躍できる研究者を養成する体制が整っています。

しかし、比較的新しい大学であるため、学生定員や卒業生がまだ少ないことから知名度が低く、研究者を志望する学生の進路の選択肢として必ずしも認知されていません。そこで、まず核融合研と総研大を知ってもらうこと、そして核融合科学の研究者を目指す若手の逸材を発掘することを目的として、「夏の体験入学」が企画されています。今年は第8回目にあたり、8月22日から8月26日までの5日間開催され、39名の学



写真1:小森専攻長を中心に、体験入学生と、専攻教員・在学生との集合写真

表1:研究体験の課題一覧

実験課題
イオンサイクロトロン加熱アンテナのインピーダンス計測のための方向性結合器の製作とその性能評価
プラズマ計測のための重イオンビーム生成実験
分光器でプラズマのイオン温度を測ろう
ミリ波干渉計/反射計によるLHDプラズマ計測
LHD実験を体験。数千ワットのプラズマから発生する磁場を計測する。
世界初!高温超伝導ヘリカルコイルの製作と実験、第2弾
核融合炉用新合金の高温強度試験
LHDにおける高エネルギー粒子の計測
解析・シミュレーション課題
核融合磁場閉じ込めプラズマの平衡・安定性解析入門
モンテカルロ法によるプラズマ輸送シミュレーション
高温プラズマの電磁流体シミュレーション
磁化プラズマ乱流のジャイロ運動論的シミュレーション
粒子シミュレーションで見るプラズマ現象
核融合プラズマからのスペクトル線解析
核融合発電炉内の中性子輸送シミュレーション

生が全国各地から参加しました(写真1)。39名のうち、大学生は26名、高専生は13名でした。

体験入学の1日目は、開校式、施設見学、懇親会を行いました。開校式では、体験入学生、受け入れ担当の教員、そしてアシスタントの学生がお互いの顔を覚えるために自己紹介をするとともに、翌日から始まる体験研究課題の簡単な紹介をしました。その後、核融合に関する基礎知識について簡単に解説を受け、世界最大の大型ヘリカル装置(LHD:Large Helical Device)や、大規模シミュレーションに活用するスーパーコンピュータを見学しました。さらに没入型バーチャルリアリティ装置“CompleXcope”で、LHDの中に入るバーチャル体験もしました。そして、夜は懇親会で交流を深めました。2日目は講義体験から始まりました。講義体験では、核融合科学専攻の小森彰夫専攻長(核融合研所長)が地球環境問題、世界と日本のエネルギー事情、核融合エネルギーの必要性、そして安全性について解説しました(写真2)。講義体験が終わると、いよいよ研究体験です。研究体験は4日目まで



写真2:講義の様子

の3日間で行われます。体験入学生は、表1で示された課題のうちのひとつに配属され、核融合科学の研究に取り組みます。各課題に2~4名の体験入学生が配属され、教員とアシスタント(在校生など)がついて研究の指導をします。学生よりも指導教員が多く、より密度の濃い指導が受けられること、そして世界最先端の実験装置やコンピュータ・ソフトウェアに直接触れられることが総研大教育の大きなメリットであり、それと同様の環境で研究体験をしました(写真3)。また、核融合研内にある宿舎で寝泊りをし、終日研究に没頭することで、研究者や、研究者の卵である総研大生の生活を体験できました。5日目の最終日は、研究体験での成果をまとめた発表会です。今回は初めての試みとして、ポスター形式での発表会が行われました(写真4)。本格的な研究発表自体が始めての体験学生が多く、自分がまとめたデータや考察でも、最初はなかなかうまく他の研究者に伝えることはできま



写真3:研究体験の様子

せん。しかし、仲間や指導教員と一緒に議論を重ね、何度も一所懸命説明するうちに自分自身でも研究に対する理解が深まって行くことを実感できたと思います。発表会は大変な盛況で、当初予定の2時間が過ぎてても熱い議論が続いていました。

今年はLHD実験期間と重なったことから、LHD実験やミーティングの見学会を設け、世界最先端のプラズマ実験に触れてもらうことができました。課題によっては、LHD実験で得られたばかりのデータを解析しましたので、大変臨場感のある研究体験ができたと思います。また、配属された課題以外のほかの課題を見学する機会を設け、視野を広げられるようにしました。核融合科学は総合的な学問であり、どの分野の学生でも、自分の大学や高専での経験を生かして、研究者として活躍できることが分かっていただけだと思います。今年度のアンケートでは、「総研大に入学したくなった」と答えた学生が6名、「総研大入学を進路の選択肢として考える」と答えた学生が22名いらっしゃいました。中には核融合研究への志を強くし、核融合炉実現のために将来はともにがんばろうという契りを交わした学生もいました。エネルギー問題が深刻化する中、このような学生がいることについて大変心強く思います。また核融合研で再会できることを期待しています。

(核融合システム研究系 准教授、総合研究大学院大学 物理科学研究科 核融合科学専攻/兼任)



写真4:成果発表会

平成23年度オープンキャンパス(一般公開)のご案内

平成23年10月29日(土)にオープンキャンパス(一般公開)を開催します。

安全でクリーンな未来のエネルギー「核融合」

内容

- 大型ヘリカル装置(LHD)見学ツアー
- 公開講座(小学生/一般向け)
- 光おっかけロボット工作
- おもしろ科学実験・工作「超簡単モーターを作ろう」
- バーチャルリアリティ体験
- プラズマくんとなかまたち
- クイズラリー

など多数

○入場は無料です。当日は、JR多治見駅および土岐市駅(下石陶磁器工業協同組合経由)から無料シャトルバスを運行します。

同時開催

- 有本尚紀プロによるテニス教室
(事前に申込が必要です。詳細は下記連絡先にお問い合わせください。)
- NIFS杯少年サッカー交流大会

《連絡先》 自然科学研究機構 核融合科学研究所
オープンキャンパス実行委員会
〒509-5292 岐阜県土岐市下石町322-6
TEL: 0572-58-2222
URL: <http://www.nifs.ac.jp/welcome/2011/>



第21回国際土岐コンファレンスのお知らせ

第21回国際土岐コンファレンス(ITC21)が岐阜県土岐市のセラトピア土岐において平成23年11月28日(月)から12月1日(木)までの日程で開催されます。国際土岐コンファレンスは核融合科学研究所が主催し土岐市で開催している核融合とプラズマに関する国際会議です。今年は“Integration of Fusion Science and Technology for Steady State Operation”(定常運転の実現に向けた核融合科学と技術の統合)という主題で開催します。期間中の11月29日(火)には市民学術講演会も併せて開催します。詳細はウェブページ(<http://itc.nifs.ac.jp/>)をご覧ください。

市民学術講演会を開催しました

平成23年7月9日(土)にセラミックパークMINOにおいて、「地球・深海・エネルギー」をテーマに市民学術講演会を開催しました。近隣の市民を中心に約270名が参加し、熱心に耳を傾けていました。

講演会の前半では、東 垣(あずま わたる)海洋研究開発機構地球深部探査センター長が、「深い海のその下、海底の世界を覗く - 「ちきゅう」で掘り明かす海底の世界 - 」と題して、地球深部探査船「ちきゅう」の活動により明らかになった海底の世界についての講演をされました。活動内容として、海底の古生物を活かしたバイオリクター(物質の分解・合成)



講演会の様子

を課題として取り組んでいることを紹介されました。後半は小森彰夫核融合科学研究所長が、「海からの資源、大型ヘリカル装置が切り拓く核融合発電」と題して、核融合発電の燃料となるリチウムを海水から採る技術を軸とし、核融合研究の現状と今後の展望について講演しました。

市民説明会を開催しました

平成23年6月28日から8月19日にかけて、土岐市、多治見市および瑞浪市において、地球環境・エネルギー問題と核融合科学研究所の重水素実験計画について、市民説明会を開催しました。

説明会には土岐市8会場で504名、多治見市14会場で232名、瑞浪市1会場で34名の方にご参加いただき、地球環境・エネルギー問題からみた核融合研究の必要性と、大型ヘリカル装置(LHD)による重水素実験計画及び安全性について、研究所から説明を行いました。



会場の様子



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.201 (2011年8, 9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。