

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.212



大型高温超伝導体サンプルの試験の様子  
(本誌、研究最前線「ヘリカル型核融合炉用超伝導コイルの革新的製作方法—高温超伝導体とその接続部の開発—」より)

2013  
JUN/JUL

## 研究最前線 …… 2-5

1億度のイオン温度をめざして 永岡 賢一  
ヘリカル型核融合炉用超伝導コイルの革新的製作方法  
—高温超伝導体とその接続部の開発— 柳 長門・伊藤 悟・橋爪 秀利

## 特 集 …… 6

Fusion フェスタ in Tokyo 竹入 康彦

## 会 議 報 告 …… 7

核融合実験に関する制御とデータ収集、遠隔実験参加についてのIAEA技術会議 長山 好夫

## トピックス …… 7-8

第2回自然科学研究機構若手研究者賞受賞  
第8回自然科学研究機構技術研究会  
ACCESS

# 1 億度のイオン温度をめざして

永岡 賢一

核融合科学研究所では、ヘリカル型と呼ばれる磁場を発生させてプラズマを閉じ込めることができる大型ヘリカル装置(LHD)を用いて、核融合を目指した高性能プラズマの研究を行っています。核融合を実現するためには、高温・高密度プラズマの定常保持が必要となります。ヘリカル型プラズマは、高密度プラズマの性能と定常保持性能は非常に優れており、LHDを用いたこれまでの研究で、他の閉じ込め方式を凌ぐ成果を挙げてきました。そのため、ヘリカル方式の研究では核融合炉心プラズマに必要な1億度の高温プラズマ生成の実証が、残された非常に重要な課題の一つとなっています。この記事では、LHDを用いて高いイオン温度を実現する取り組みについて紹介します。

2012年に行われた第16サイクルのLHD実験では、「8,500万度のイオン温度の実現」及び「5,800万度のイオン温度の定常保持」という2つを目標に掲げて取り組みました。この実験では、外部から入射するビームによってプラズマを加熱します。図1は、ビーム加熱電力の増加により

イオン温度が上昇する傾向を示しています。第16サイクルの実験では、入射ビームの電力は第15サイクルと変わらないため、さらにイオン温度を上げるためには、このビーム加熱電力を効率よくプラズマ中心部へ集めることが鍵となりました。そこで、プラズマを閉じ込める真空容器内側の表面状態を調整するために、ヘリウムプラズマ放電を大電力のビーム加熱実験の直前に繰り返し行いました。この壁の調整の手法は、一昨年度の第15サイクルの終了間際にその効果が確認されたもので、第16サイクルで更なる最適化を進めました。プラズマが接する壁の調整は、壁表面に付着している水素を除去することにより、水素プラズマ放電におけるプラズマ周辺部の背景ガス圧力を下げる効果があります。背景ガス圧力が高いと入射したビームの損失を増加させるため、その抑制がビーム加熱の効率を向上させる効果があると考えられています。

このヘリウムプラズマによる壁調整放電を念に行った後の実験で、目標であった8,500万度のイオン温度のプラズマ生成に成功しました(図

2参照)。このプラズマは、微量な炭素ペレット(1ミリメートルサイズの粒)をプラズマ中に高速で打ち込んだ後に得られたものです。現在のところ8,500万度の高温プラズマは、40ミリ秒という短い時間しか維持できていません。炭素ペレットを導入することで得られる瞬間最大風速のような記録です。この炭素不純物の効果は、瞬間的にイオン加熱効率を高めることが予想されていますが、プラズマ中の熱エネルギーの伝わり方にも影響している可能性があり、その併用には更なる研究が必要な課題です。

このように瞬間的な高い温度の実現ができましたが、将来の核融合炉では、定常的に高温のプラズマを保持することが必要なため、高温プラズマの定常保持にも取り組みました。8,500万度のイオン温度実現に有効であったヘリウムプラズマによる壁調整は、高イオン温度プラズマの定常保持にも大変有効でした。炭素ペレット入射を行わない放電で、6,400万度のイオン温度を1秒間保持することができました(図3参照)。16サイクル以前の記録は5,200万度の1秒間保持でしたので、20%程度記録を更新することができました。1秒間という時間は、プラズマの閉じ込め性能を表すエネルギー保持時間(この実験では、50ミリ秒から100ミリ秒程度)の10倍以上であるため準定常的に保持することができたと考えることができます。また、この保持時間は、

外部から入射している加熱ビームにより制限されているため、より長いビーム入射を行うことにより更に長時間の保持が期待されています。

ビーム加熱電力の増力がなかった第16サイクルでも、ヘリウム放電による壁調整効果を高めることで、イオン温度に関する目標を達成することができました。最終目標である1億度以上のイオン温度への見通しをより確かなものにするができたと考えています。さらに、次の第17サイクルの実験からは、高イオン温度のプラズマと高電子温度のプラズマを統合することにも挑戦する予定です。図4に示すように、これまでの実験では、高イオン温度プラズマと高電子温度プラズマは独立に生成されており、その両立には至っていません。イオン温度と電子温度が共に高いプラズマは、プラズマ中の熱の伝わり方が複雑になることが理論的に予測されているため、プラズマ物理としても大変興味深い研究対象です。このように核融合を目指したプラズマの高性能化研究と関連するプラズマの物理研究を2本柱として、今後も研究を進めていく予定です。

(プラズマ加熱物理研究系 助教)

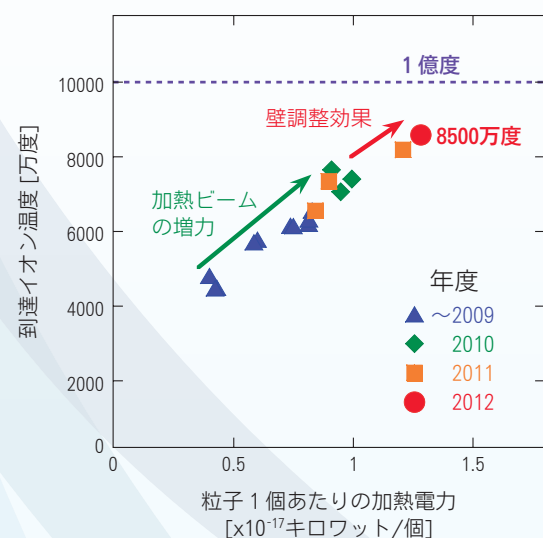


図1 イオン加熱電力の増加によるプラズマ中心部のイオン温度の上昇。

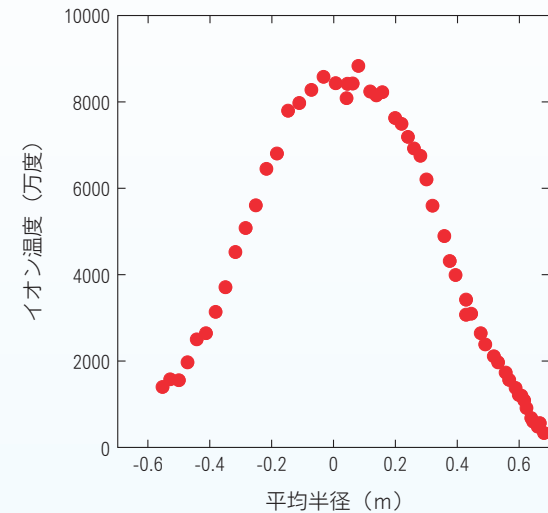


図2 8,500万度を達成したプラズマのイオン温度分布。

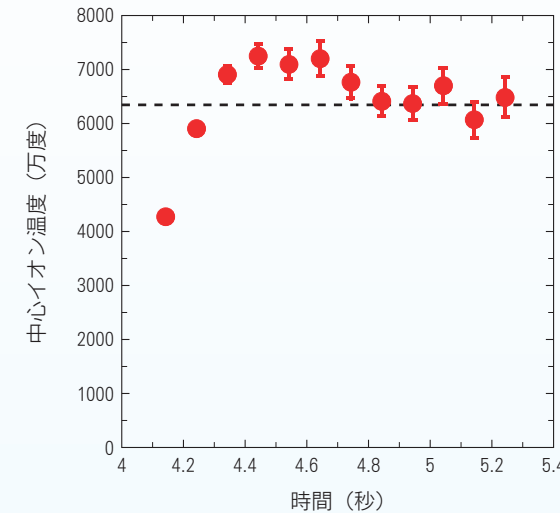


図3 6,400万度の1秒間保持に成功したプラズマの中心イオン温度の時間変化。

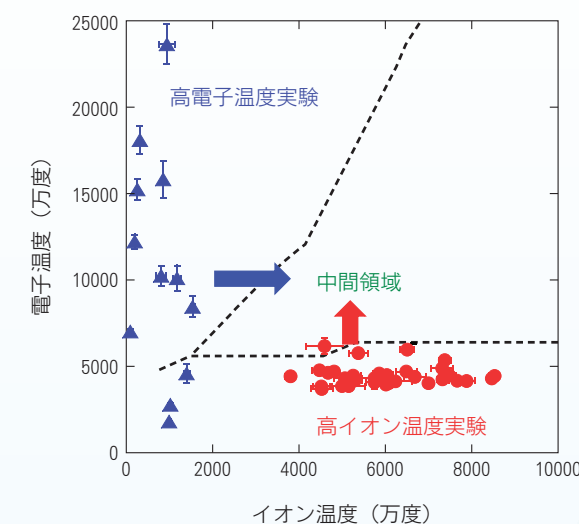


図4 これまでの実験で得られた高イオン温度プラズマと高電子温度プラズマの温度領域。今後は、両者の中間領域の開拓に挑戦する予定です。点線は、プラズマ中の熱の伝わる性質が異なると理論的に予想される境界線。中間領域では、複雑な熱の伝わり方が予想されています。

## ヘリカル型核融合炉用超伝導コイルの革新的製作方法 — 高温超伝導導体とその接続部の開発 —

柳 長門、伊藤 悟、橋爪 秀利

大型ヘリカル装置(LHD)で得られた優れたプラズマ閉じ込め実験の成果を受けて、「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FFHR-d1の設計とそれに向けた要素技術研究を行っています。その中から今回は、巨大な超伝導コイル(電磁石)に用いる先進的な大電流導体とそれを使った従来の常識では考えられないコイルの製作方法についてご紹介します。

FFHR-d1は大きさがLHDの4倍となり、高温プラズマを閉じ込めるためにねじれた磁場を発生するヘリカルコイルは、ドーナツの直径が30mにおよびます。その巻線には最大磁場13テスラ(1テスラは地磁気の約2万倍)がかかる状態において、10万アンペアの電流を流す「超伝導導体」が必要となります。「超伝導」はある特殊な物質を低温に冷やすと電気抵抗がゼロになる現象です。電気抵抗がないことで大きな電流を流せるため、超伝導物

質で作った「線材」や、線材をたくさん束ねた「導体」をコイルの巻線に用いると強力な磁場を発生させることができます。(ちなみに、もし普通の銅線でコイルを巻いて10万アンペアの電流を流すと、凄まじい発熱のため、短時間しか通電できないことになります。)

さて、巨大で複雑なヘリカルコイルを製作するのはとても難しい技術です。さらに、核融合炉全体の建設工程を考えると、いかにこれを速く作れるかも重要です。大きさ4分の1のLHDでは、ドーナツの周りに導体を900回ぐるぐると巻くのに1年半かかりました。したがって、FFHR-d1ではもっと速い方法を模索することが有益です。そこで、らせんの半周ごとに導体を接続しながら製作する方法を提案しています(図1)。これは従来にない革新的な発想ですが、これを可能とするのが「高温超伝導」導体です。

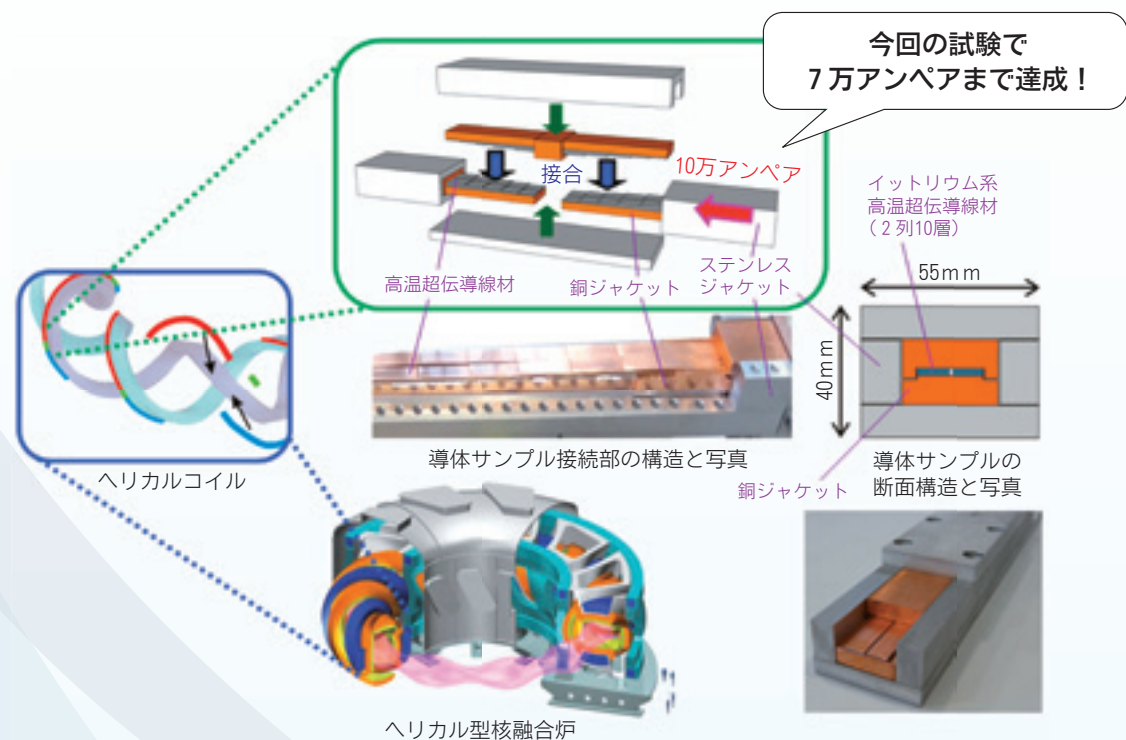


図1 高温超伝導導体を用いたヘリカルコイルの接続方式による巻線方法の概念図。

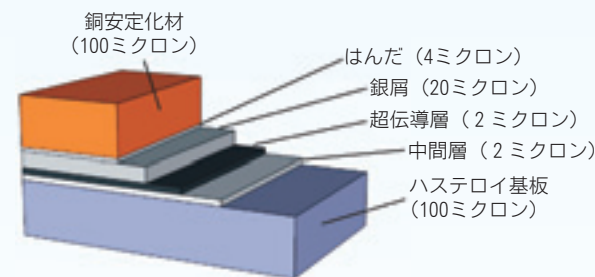


図2 テープ形状をしたイットリウム系高温超伝導線材の構造図。横幅は1センチ。厚み方向にイメージを拡大。1ミクロンは千分の1ミリ。

LHDなど現在稼働している核融合実験装置の巻線導体には、「金属系・低温超伝導線材」が用いられ、液体ヘリウムを注いで絶対温度4度(摂氏マイナス269度)に保っています。これに対して、「銅酸化物系・高温超伝導線材」は、マイナス196度の液体窒素でも超伝導になります。この線材の超伝導層は陶器などと同じセラミックで、1986年に超伝導になることが発見され、世界が驚きました。その後、四半世紀に渡る研究開発により、実用に使える線材技術が進展しました。特に、日本が開発をリードしている「イットリウム系線材」は、高い温度と強い磁場においても大きな電流を安定に流すことができます。また、セラミック自体は薄い膜として強固な金属基板の上に乗っているため(図2)、低温超伝導線材に比べて圧倒的に高い機械的強度を有します。この線材を用いて大電流導体になると、高い温度で使えるため、接続部分で生じる発熱が低温超伝導導体と比べてあまり問題になりません。

今回、この線材20枚を単純に積層して銅とステンレスのジャケットに収め、導体サンプルを製作しました(図1に断面、図3に全体)。ここで、従来の低温超伝導線材で大電流導体を構成する場合、細くて丸い形状をした線材をいろいろなやり方で複雑に撚り合わせてきました。そうしないと電流が線材の間で偏って安定に流れないからです。これは、ロープを作るときに、それぞれの「線材」に均等に力がかかるように撚らないと全体として強くできないことに似ています。このため、高温超伝導線材を用いる場合も、線材同士を撚り合わせるのが基本として一般に考えられています。ただし、高温超伝導線材は図2のようにテープ形状をしているので、撚るためにはいろいろと無理が生じます。一方、この線材は1本ずつが高い温度まで超伝導となるため、もし撚らずに使って電流が多少偏っ

てもスムーズに再配分してくれて大きな問題はないはずと考え、「逆転の発想」として単純積層方式を提案しました。今回のサンプルを試験したところ、絶対温度30度、外部磁場6テスラにおいて3万アンペア以上の電流を長時間安定に流すことに成功したため、この方式が使えると確信しています。また、絶対温度4度、磁場1テスラでは最高7万アンペアに達しました。これは高温超伝導導体として世界に突出した記録であるだけでなく、現在建設が進んでいる国際熱核融合実験炉ITERに用いられる低温超伝導導体(絶対温度4度、磁場12テスラで6万8千アンペア)にも匹敵する性能です。

導体サンプルの一部には、機械的接合部を入れています。これは、東北大学の量子エネルギー工学専攻で研究開発されてきた技術です。これを使うとヘリカルコイルの巻線導体の分割製作(図1)が可能になるだけでなく、最終目標としてはコイル全体が着脱可能となり、今後、他分野への応用も期待できます。今回のサンプルではこの接合技術を用いて電流ループを形成し、変圧器の原理である電磁誘導方式によって大電流を流しました。測定された接続抵抗は核融合炉に適用できる十分に低い値となっています。

工学プロジェクトでは、今後、ヘリカル型核融合炉のコイルに使える10万アンペア級の導体と接合部を試験する計画です。

柳 長門(装置工学・応用物理研究系 准教授)  
伊藤 悟(東北大学大学院工学研究科 助教)  
橋爪秀利(東北大学大学院工学研究科 教授)



図3 左: 大型高温超伝導導体サンプルと総研大生の寺崎義朗君、右: 核融合科学研究所超伝導マグネット研究棟の大型導体試験設備へのサンプル装着の様子。

## Fusion フェスタ in Tokyo

竹 入 康 彦

ゴールデンウィーク中の5月3日に、日本科学未来館(東京都江東区青海)において「Fusion フェスタ in Tokyo 2013 ー核融合！未来を創るエネルギーー」を開催しました。核融合科学研究所では、毎年秋にオープンキャンパスを開催して、研究所の施設を公開していますが、より広く一般の方々に向けて、研究所および大きく進展している核融合研究について知っていただくために、平成22年度より本イベントを東京で開催しています。4回目となる今回も昨年と同様に、ゴールデンウィーク後半の初日に開催し、約1,700名の参加を頂きました。

本イベントは講演会と科学教室・展示から構成されています。講演会では、小森彰夫所長より核融合の原理や燃料の普遍性、核融合研究の進展と今後の見通しについての講演を行いました。田中宏彦助教は「うまいプラズマの秘伝レシピ」と題した家族向けの講演、中野治久助教からは「電気の作り方とカクユウゴウ」と題した子供向けの講演、私からは核融合発電のしくみと実現への道筋についての講演を行いました。講演の途中には、高速インターネット回線を用いて研究所からの実況ライブ中継を行い、東京の会場と会話をしながら、研究所のレポーターが大型ヘリカル装置(LHD)の真空容器の中や制御室から装置の説明などを行いました。会場の方々にはLHDの迫力や研究所の様子を臨場感高く実感して頂けたと思います。また、特別講演として、國中均教授(宇宙航空研究開発機構・月惑星探査プログラムグループ、プログラムディレクタ)をお招きして、「新機軸イオンエンジンが

拓く「はやぶさ」1号／2号小惑星探査」と題する講演をいただきました。國中先生は講演の中で、「はやぶさ」プロジェクトについて、「未来は創り出すもの、挑戦なくして未来はない」と言及されましたが、このことは核融合の実現へ向けた研究開発にまさしく当てはまるものと感じました。いずれの講演でも多くの質問が会場より寄せられ、参加者の方々の核融合研究への関心と期待の大きさがうかがわれました。

科学教室・展示では、核融合に関連深い技術を利用した巨大プラズマボール、超伝導磁気浮上列車、真空実験、分光、放射線観測などの実演を行いました。お絵かきをするロボット製作とセラミック折り紙体験の科学工作教室は多数の希望者があり、抽選を行うほどになるなど、親子連れに大変な人気でした。核融合プラズマの研究に関連したコンピュータシミュレーション技法を用いたプラズマの3次元映像も、多くの方に体験して頂きました。また、スーパーサイエンスハイスクール(SSH)の提携校の高校生による研究発表も大変好評でした。核融合の説明やLHDの最近の研究成果などのパネルにも多くの方が関心を示されるなど、科学に親しみながら核融合について理解を深めていただけたのではないかと思います。

核融合研究の重要性と科学の楽しさをより広く知って頂くため、今後も東京でのイベントを開催していきます。次回は、平成26年の5月頃の開催を予定しています。

プラズマ加熱物理研究系 教授  
Fusion フェスタ in Tokyo実行委員長



國中均教授による講演会は、会場が満員になるほど大盛況でした。



科学教室の一つである磁気浮上列車の様子。どの科学教室も大人気でした。

## 核融合実験に関する制御とデータ収集、遠隔実験参加についてのIAEA技術会議

長 山 好 夫

国際原子力機関(IAEA)が主催し隔年で開催される第9回「核融合実験に関する制御とデータ収集、遠隔実験参加」の技術会議が、2013年5月6～10日、中国合肥市中国科学院合肥研究所で開催されました。この会議はこの分野の非常に権威の高い会議であり、世界中からコンピュータや制御の専門家が集まります。今回は参加者(120人)の半分は中国国外からで、日本からは7人(本研究所からは3人)が参加しました。合肥研究所は超伝導トカマクEASTを自力開発しており、見学会もありました。初日のほとんどはITER関係の発表でした。韓国の超伝導トカマクKSTARではITERで考えられている制御システムを電子密度制御に適用した実機試験が行われました。日本からは青森県六ヶ所村のITER遠隔実験センターの発表とITERの膨大な実験データを高速転送するための新しい並列転送方式の発表がありました。

実験前に運転シミュレーションを行い、制御パラメータの設定値の該非判定を行う研究が進んでいます。今回フランスからKeplerという科学ワー

クフローのツールを用いた実験前シミュレーションが発表され注目されました。実験データ解析は計測データと計算コードが多重に組み合わせられたワークフローですので、Keplerの応用は拡がりそうです。波形検索技術を用いた特定現象検出は、データ解析だけでなく制御でも重要です。中国ではマイクアレイで拾った音声信号から相関解析で異常音の発生源を突き止めるシステムを開発し、このシステムを用いて音の方向に動くロボットの実演をして参加者の関心を集めました。データ収集においては画像データなどでデータ量が爆発的に増加する問題を抱えており、LHDはじめ各装置で解決策の検討が進んでいます。遠隔実験参加については、インターネットのウェブブラウザ上でデータ解析する方向での開発が進んでいます。

会議の発表論文は、査読を経た後、Fusion Engineering and Design誌の特集号として発行されます。次回の会議は、2015年にインドで開催されます。

(高密度プラズマ物理研究系 教授)

## TOPICS トピックス

### 第2回自然科学研究機構若手研究者賞受賞

本研究所の高温プラズマ物理研究系の後藤基准教授が、「絶対分光計測と非平衡原子モデルによるプラズマ診断の研究」によって、第2回自然科学研究機構若手研究者賞を受賞しました。今回の受賞は、高精度の分光計測と衝突輻射モデルと呼ばれる計算モデルによる核融合プラズマの定量的分光研究の手法を確立させたこと、とくに、プラズマ中心部の粒子発生率を初めて実験において明らかにした業績が評価されたことによるものです。本研究により、粒子輸送研究の新たな展開が期待されています。



受賞者による記念撮影(後藤准教授は前列左2人目)



後藤准教授による記念講演

## 第8回自然科学研究機構技術研究会

平成25年6月6日から7日にかけて、第8回自然科学研究機構技術研究会が核融合科学研究所で開催されました。自然科学研究機構は5つの大学共同利用機関(国立天文台、核融合科学研究所、基礎生物学研究所、生理学研究所、分子科学研究所)から構成されており、その研究分野は多岐に渡っています。この研究会は、機構内の技術系職員が、多様な科学技術の交流と連携を通じ、技術系職員のネットワークを構築することを目的としています。毎年5つの機関の持ち回りで開催されており、今回は当研究所の主催で、約80名の技術系職員が参加しました。

小森彰夫所長、飯間理史技術部長による開会挨拶の後、竹入康彦大型ヘリカル装置計画実験統括主幹が「核融合研究の最前線—ヘリカルが切り拓く未来のエネルギー」と題した特別講演を、その後二日間にわたって研究機関毎の技術セッションが行われました。技術セッションでは、それぞれ1時間半の持ち時間で、座長役として代表者1名が自身の研究機関の概要を説明し、続いて4～5名の職員が各自の業務内容について発表しました。発表後には熱心に積極的な質疑応答が行われ、普段の業務とは違った分野への興味と理解を深めることができました。核融合科学研究所からは、代表者として加熱技術課の小林策治課長が研究所の概要と技術部の活動状況について紹介した後、技術部の各課から1名ずつ計5名が発表しました。発表タイトルと発表者は次のとおりです。「曲面ミラーの製作」(製作技術課:岡田光司)、「プラズマ電子加熱技術の紹介」(加熱技術課:伊藤 哲)、「LHD計測データストレージシステムの構築」(計測技術課:小嶋 護)、「冷却水棟改修工事と運転監視モニタツール作成」(装置技術課:土伏梯之)、「核融合科学研究所の有機溶剤等の管理」(制御技術課:横田光弘)。

また、7日午後には核融合科学研究所の施設見学も実施され、中央制御室や本体室、液化機室を他の機関の方々に見学していただきました。



参加者による記念撮影

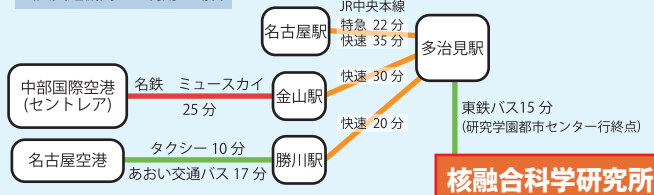


発表を行う小嶋係長

## アクセス ACCESS



### 公共交通機関をご利用の場合



### 高速道路をご利用の場合

- ・中央自動車道 多治見または土岐ICから20分
- ・東海環状自動車道 土岐南多治見ICから5分



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.212 (2013年6, 7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](mailto: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](mailto:info@jaacc.jp) 著作権の転載・翻訳のような、複写以外の許諾は、直接本研究へご連絡ください。