

NIFS NEWS

No 262

2021 October / November

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



Webアニメ「ヘリカちゃんと核融合エネルギーを作ろう」のワンシーン

特集 P2 - P3

核融合科学研究所オープンキャンパス 2021
「体感！体験！プラズマエネルギー」

高畑一也・鈮持尚輝・舟場久芳
矢治健太郎・磯部光孝

研究最前線 P4 - P5

水素リサイクリングモデルによって明らかに
なった壁からの高回転エネルギー水素分子の放出
齋藤誠紀・中村浩章

特集 P6 - P7

“ものづくり”の拠点、工務棟

横田光弘

トピックス P8

- ・令和3年度市民説明会の中止に関して
- ・第23サイクルのプラズマ実験を開始
- ・小林達哉助教が
「2021 IUPAP Young Scientist Award in Plasma Physics」
を受賞
- ・LHD 消火訓練を実施

核融合科学研究所オープンキャンパス2021 「体感！体験！プラズマエネルギー」

高畑一也・釧持尚輝・舟場久芳・矢治健太郎・磯部光孝

9月4日（土）に、毎年恒例の秋のイベント、オープンキャンパスを開催しました。今回で24回目となるオープンキャンパスは、「体感！体験！プラズマエネルギー」のテーマのとおり、楽しんで科学に触れることができる体験型イベントです。なお、今回も昨年同様、新型コロナウイルス感染症防止対策のため、オンラインで画面越しに科学に触れていただくことになりました。当日は、のべ500名以上の方にご参加いただきました。ご視聴いただきました皆さまに改めて御礼申し上げます。

オープンキャンパスでは、ライブ配信と、あらかじめ製作した動画コンテンツの配信を行いました。ライブ配信では、「大型ヘリカル装置（LHD）見学ツアー」、「公開講座」、「高校生科学研究所オンライン発表会」、「サイエンストーク」、「核融合研究者への道～核融合科学研究所で学ぼう！研究最前線～」の五つを実施しました。また、動画コンテンツ配信では、20本のコンテンツを配信しました。

「LHD見学ツアー」については合計2回行い、のべ220名以上の方にご視聴いただきました。本ライブ配信では、司会者席、制御室、加熱装置室（第2回はヘリウム液化冷凍機室）、本体室との4元中継を行いました。まず初めに、司会者から核融合科学研究所及び核融合エネルギーについて紹介しました。続いて制御室を紹介しました。約400台のパソコンが置かれている制御室では、日頃こういった場所で研究者が実験しているのかを、お伝えしました。また、プラズマを温めるための装置が置かれている加熱装置室や、LHDの超伝導コイルを冷やす装置が置かれているヘリウム液化冷凍機室への中継を行い、簡単な科学実験を交えながら説明をしました。最後に、本体室を紹介しました。本体室には、世界屈指の大きさを誇るプラズマ実験装置であるLHDがあります。通常の見学コースにはない様々な機器の間近からも臨場感のある映像をお届けしました。当日は、視聴者の皆

様からチャットで多くのご質問をいただき、LHD見学ツアーの盛り上がりを感じました。

「公開講座」では第一部として吉田善章所長による「サイエンスとしての核融合・『マクロ』とは何か―束縛が生む多様性」、第二部として居田克巳教授による「プラズマの謎に迫る」の題目で、講演会を開催しました。第一部では、「核融合のサイエンスとは何か、どういう位置づけにあるのか」について紹介しました。科学の関心は17世紀には宇宙の秩序にあり、20世紀はミクロの世界の秩序・量子論に向かいました。その後「ミクロの和でマクロを記述できない」という複雑性が明らかになり、現代の科学は再び宇宙からそのメカニズムを知るようになっていきます。核融合研究では、マクロなシステムの複雑性の事象・構造を理解し、実験装置の中でどのようにプラズマが安定になるかを知ることから、核融合という理想的なエネルギーを得る挑戦を行っています。生物や宇宙のプラズマを例に示し、羊の群れ、渦巻銀河、降着円盤、磁気圏などから、共通の構造は「渦」であり、宇宙では渦の中に循環する運動が閉じ込められている、という説明がありました。第二部では、プラズマで見られる突発現象を例として、LHDにおける研究でこれまで分かったこと、解いていく必要のある謎について、身近な現象と比べ



LHD見学ツアーにて、視聴者に挨拶するスタッフ



LHD見学ツアーにて、実物大モデルによる実験装置の説明をする研究者

ながら解説しました。突発現象は前兆現象の無いものでいつどこで起こるかをすることが難しく、その突発現象が起きるきっかけが重要であることを解説しました。身近な例として、ししおどし、地震や集中豪雨、さらにゾウのがんが少ないことなども紹介しながら、説明しました。

「高校生科学研究室オンライン発表会」では、名古屋市立向陽高等学校、名古屋経済大学市邨高等学校、岐阜県立恵那高等学校、愛知県立一宮高等学校の4校から9件の発表がありました。テーマとして熱力学、気圧と発芽率、海洋汚染、弦の固有振動、防カビなど身の回りの現象を調べるものなど、多岐にわたったものが取り上げられ、常時約50名の参加者がありました。多くの優れた発表がありましたが、審査の結果、「靱殻を用いた電気二重層コンデンサの作製」（一宮高等学校）が優秀発表賞に選ばれました。

「サイエンストーク」では、三戸利行特任教授による「高温超伝導って、熱いの？それとも冷たいの？」、岡村昇一特任教授による「私たちの体の元素はどこから来たのだろうか？」、矢治健太郎特任専門員による「宇宙と核融合、ステキな関

係」の合計3回行い、合わせて約100名の参加者がありました。特に高温超伝導の話題は参加者の関心を集め、「将来、1気圧で室温超伝導を実現できる見込みはありますか？」などの質問がありました。

「核融合研究者への道」では、研究者と参加学生が個別にオンラインにて対談し、研究所が行っている研究教育活動を紹介しました。この企画は、研究所に併設されている国立大学法人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の大学院広報活動の一環として毎年開催しています。参加学生の皆さんは、将来のエネルギー問題に高い関心を持ち、総研大への進学を視野に入れた方ばかりでした。将来、今回参加していただいた皆さんと一緒に研究できる日が来ることを楽しみにしています。

動画配信では、Webアニメ「ヘリカちゃんと核融合エネルギーを作ろう」が特に人気があり、1日で160回を超える再生がありました。職員だけで作り上げたアニメは、完成度も高く、核融合研究を分かりやすく説明した内容に仕上がっています。

なお、ライブ配信の録画映像、動画コンテンツの一部は、核融合科学研究所のYouTubeチャンネルで引き続き公開しています。（公開URL：https://www.youtube.com/channel/UCFceexB_fUEHwkaw8PYfgw）

（装置工学・応用物理研究系 教授／
オープンキャンパス2021実行委員長、
プラズマ加熱物理研究系 助教、
高温プラズマ物理研究系 助教、
研究力強化戦略室 特任専門員、
高温プラズマ物理研究系 教授）

核融合エネルギーとは

- ・ 物質の状態変化 → エネルギー
 - 分子(電子)の状態変化→化学エネルギー
 - 原子核の状態変化→核エネルギー
- ・ エネルギー発生のマクロな仕組みは？
 - 太陽のエネルギー発生メカニズム
 - 安定的な核反応が持続されるための「構造」
 - プラズマ物理学

公開講座にて、講演を行う吉田善章所長

水素リサイクリングモデルによって明らかになった壁からの高回転エネルギー水素分子の放出

齋藤誠紀・中村浩章



はじめに

プラズマが炉壁へ与える影響を最小限に抑える手法として、中性のガスを噴射し壁近傍のプラズマを中性の水素原子・分子に戻す方法(デタッチメント)が検討されています。このような環境下では、水素原子だけでなく、壁近傍に存在する水素分子の存在がプラズマの挙動に強く影響すると予想されています。このプラズマ挙動を正しく理解するためには、水素リサイクリングとよばれる、炉壁から水素分子が放出される過程を解明することが大切です。さらに、放出した水素分子がプラズマに与える影響は、その分子の振動と回転の状態にも強く依存するため、これらの状態を知ることも大切となります。これらの情報を実験によって得ることは困難なため、原子の運動方程式を解く分子動力学法とよばれるシミュレーション手法を用いて、水素原子・分子の放出過程の詳細や、水素分子の振動・回転エネルギーを計算する手法「水素リサイクリングモデル」を開発しました。さらに、このモデルを用いて得られた情報を使って、放出原子・分子のプラズマ中での振る舞いを計算することにも成功しました。本稿では、これらの計算によって明らかになった、水素原子・分子の放出過程、放出原子・分子の特徴などを紹介します。

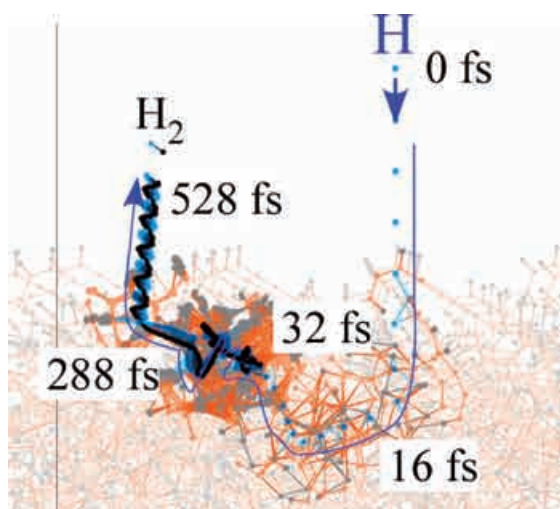


図1 炭素壁水素リサイクリングモデルの計算例。橙色は炭素原子、灰色は壁内の水素原子、水色は入射水素原子の軌跡を表しています。黒色は入射水素原子と結合した壁内の中の水素原子を表します。数値はシミュレーション開始からの経過時間で、単位fsはフェムト秒(フェムトは1000兆分の1)を意味します。

炭素壁からの水素分子の放出過程

水素リサイクリングモデルを用いて明らかにした、炭素壁からの水素分子の放出過程の例を図1に示します。炭素壁に入射した水素原子(水色)が炭素壁の中を移動し、壁内の水素原子(黒色)と化学結合して分子を形成し、表面から放出されています。この過程以外にも、入射水素原子がそのまま反射して放出する、壁の中の水素原子が入射原子との衝突によりはじき出され、別の水素原子と結合し分子となる等、様々な放出過程があることも見つけました。また、放出した水素分子の振動・回転エネルギーを計算することにも成功し、1電子ボルト程度の比較的大きな振動・回転エネルギーを有する分子が発生することも発見しました。図2では、この水素リサイクリングモデルを用いて計算した、回転エネルギーごとの水素分子が放出される割合(放出係数)を示しています。従来、分子は熱的な過程により放出されると考えられてきました。そのため、放出する水素分子の振動・回転エネルギー分布は、炉壁の温度に相当するボルツマン因子で表せると考えられてきました。しかし、図2に示すように、放出される水素分子はボルツマン因子から外れています。これは、入射水素原子と炭素壁内の原子たちとの衝突は非平衡状態にあり、ボルツマン因子で想定されるより高い回転エネルギーの分子が放出されていることを意味します。これらの高いエネルギーを有する水素分子が、

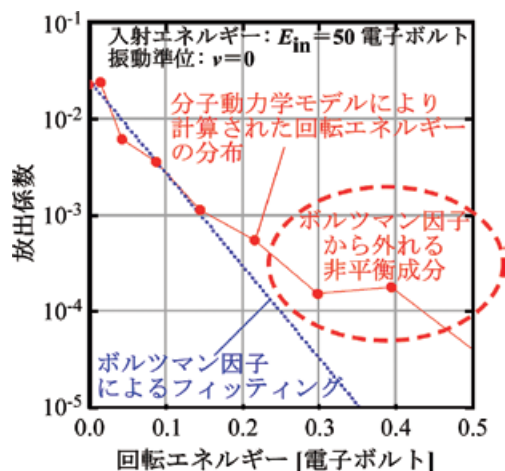


図2 炭素壁水素リサイクリングモデルに得られた水素分子の回転エネルギーの分布。

従来考えられているよりも周辺プラズマの挙動に強く影響する可能性が示唆されます。

タングステン壁からの水素分子の放出過程

ITERなどの炉壁(ダイバータ)に用いられるタングステン壁を対象にした水素リサイクリングモデルの開発も行いました。そのモデルを用いて発見した、タングステン壁からの水素分子の放出過程を図3(a)に示します。これは、壁材料の表面において水素分子が形成されるという反応過程で、炭素壁の場合は見られなかったものです。この過程の詳細は以下のとおりです。入射水素(橙色)により炉壁の中の水素原子(黒色)がはじき出され表面から放出されますが、この放出水素原子はタングステン壁表面近くに捕まってしまう(灰色)。この捕まる場所は、図3(b)に示すようなタングステンと水素原子との相互作用エネルギーが負になる領域(青色)です。この領域に捕まえられた水素原子は、炉壁表面に対して垂直方向(z方向)の移動は制限されますが、炉壁表面と並行方向(x方向)には移動できます。この移動によって、同じく捕まえている別の水素原子(黒色)とたまたま出会った場合には、二つの原子は化学結合して水素分子となります。この分子になることでタングステン壁との相互作用エネルギーが変わり、壁から斥力を受けて加速しながら表面を離れます。このように、タングステン壁特有の放出過程を明らかにしました。

中性粒子輸送計算との連携

炭素壁水素リサイクリングモデルを用いて得られた放出水素原子・分子の情報を用いて、それら

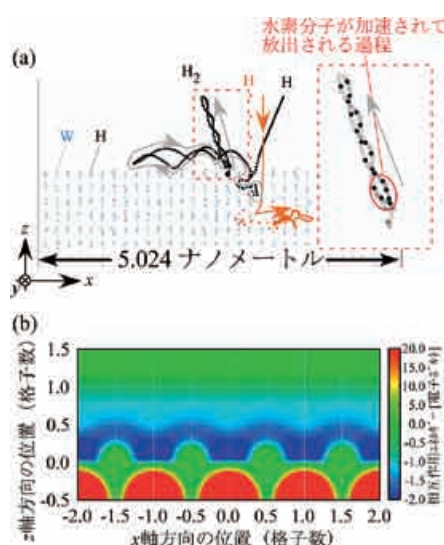


図3 (a)タングステン壁水素リサイクリングモデルの計算例。水色はタングステン原子、灰色及び黒色は水素原子、橙色は入射水素原子の軌跡を表しています。(b)タングステン壁の表面近傍における水素原子とタングステン壁の相互作用エネルギーの空間分布。

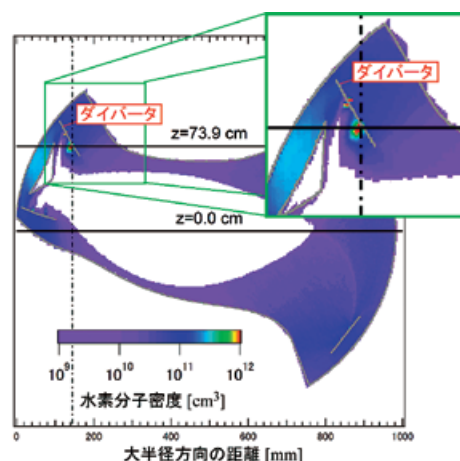


図4 LHDを対象に実施した中性粒子輸送計算の例。周辺プラズマ中の水素分子の空間分布を示しています。

中性粒子が大型ヘリカル装置(LHD)のプラズマの中でどのように振る舞うかを計算しました。この中性粒子輸送計算では、LHDのプラズマの電子温度・密度などの情報が必要ですが、それらはEMC3と呼ばれる流体計算コードを用いて計算しています。図4は、このような中性粒子輸送計算の結果で、LHDのポロイダル断面における周辺プラズマ中の水素分子の分布を示しています。炭素でできている、ダイバータと呼ばれる炉壁から放出された水素原子・分子が、電離や再結合を引き起こしながら周辺プラズマ中を輸送していく過程を計算することに成功しました。また、ダイバータから放出される高い振動・回転エネルギーを有する水素分子が高い反応性を持つため、ダイバータから数センチメートルの距離で消失することが明らかになりました。

今後の展開

LHDでは水素分子からの発光を分析することにより、ダイバータ近傍に存在する水素分子の振動・回転エネルギーの分布を計測することにも成功しています。今後、この計測結果と計算結果との詳細な比較を行う予定です。

また、水素リサイクリングモデルの改良にも取り組みます。リサイクリング過程には、壁の温度や壁へ入射する水素原子のエネルギー、壁内の水素密度などが影響しますが、今回開発したモデルは扱えるパラメータの範囲が限られています。これを改良し、広範囲のパラメータに対応し、壁と動的に変化する周辺プラズマを一挙に計算したいと考えています。やがては、デタッチメントを想定した原型炉の設計などへ本モデルを適用することを展望しています。

(山形大学理工学研究科 准教授、
基礎物理シミュレーション研究系 教授)

“ものづくり”の拠点、工務棟

横田光弘



図1 工務棟外観

はじめに

LHD実験を支える技術部の“ものづくり”の拠点である工務棟をご紹介します。

核融合科学研究所(以下、研究所)の敷地に入って東側の車両ゲートを通過し、左に大きくカーブした先に工務棟(図1)があります。研究所の職員でも訪れたことがある人がそれほど多くはないこの建物で、LHD実験で使用される数々の実験装置や部品が製作されています。研究所内で製作することにより、装置の設置場所における実験環境など、必要な条件を事前に把握することができ、不具合発生時には迅速に手直しや修理対応することができます。

工務棟は、名古屋大学プラズマ研究所時代の工務部の流れを汲んだ機械工作や回路工作を行う技術職員の活動拠点として、平成12年1月に完成しました。1階は、実験に必要な物品を在庫している中央部品室と2階まで吹き抜けの機械工作室、2階には回路工作室があります。それでは、各室を順番にご説明します。



図2 機械工作室



図3 マイクロ波伝送用マイターバンド

機械工作室

機械工作室(図2)の扉を開けると、オイルのにおい、機械の大きな駆動音と共に、大小何台もの工作機械が目飛び込んできます。「研究所」という言葉の印象からは想像がつかない光景です。機械工作室には、数値制御工作機械(マシニングセンター、NC旋盤)や汎用工作機械(旋盤、ボール盤)、溶接機等々、材料の加工を施すための機械がたくさん設置されており、LHD実験で使用される実験装置や部品を製作しています。実験装置やその部品は、非常に複雑な形状をしており、加工に当たっては $\pm 0.001\text{mm}$ と高い加工精度が求められることがあります。一例としてLHD実験でマイクロ波の伝送効率向上や製作コスト削減に大きく貢献したマイクロ波伝送用マイターバンドと呼ばれる製作品をご紹介します。図3に示すように円筒の内径にコルゲートと呼ばれる連続した溝(幅 0.6mm 深さ 0.6mm)を精度よく加工する必要がありました。1個製作するのに3日要し、これまで100個

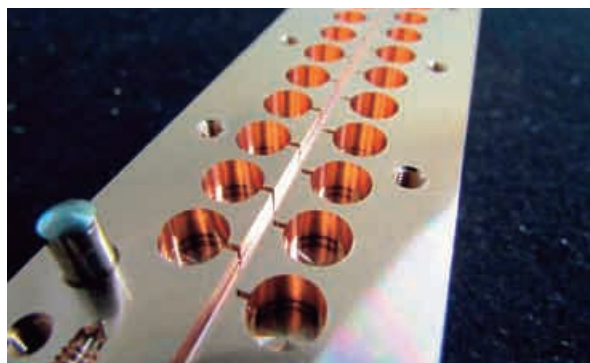


図4 ノッチフィルター

ほど製作しました。特定周波数のマイクロ波を除去するノッチフィルター(図4 19mm×33mm×113mm)は、電場解析を行い最適化した値を設計に反映し製作しました。また、完成後に周波数特性の試験も行いました。これ以外にも、アルゴンガス溶接を使用した超高真空用の溶接品も提供しています。

回路工作室



図5 タイミング復調回路



図6 マイクロ波加熱燃焼装置用制御回路

研究者が実験データの取得や実験装置を動作させる場合は、必ず計測・制御用の電子回路が必要となります。回路工作室では研究者の要求仕様に応じた設計製作、開発、修理、改造等を行っています。デジタル回路としてはFPGA (Field Programable Gate Array) を利用することが多く、各計測器に高精度のタイミング信号を配信するタイミング復調回路(図5)、また、マイクロコンピュータを利用したマイクロ波加熱燃焼装置用制御回路(図6)を製作しました。アナログ回路では、レーザー干渉計の信号からプラズマ電子密度情報を得るための位相検出回路(図7)、プラズマからの光を分光した微小信号を増幅するプリアンプ回路(図8)を製作しています。製作した回路は設計の難しさが原因で仕様通りに動作しないこともあります。また、ノイズや予想外の動作不良問題に悩まされることがよく起こります。苦勞の末に所望の動作を達成した時の嬉しさは、一入(ひとしお)です。研究者の要求仕様に応じた最適な回路を提供するべく、回路シミュレータを活用して事前に問題点を洗い出

し、設計時間の短縮と正確な動作を目指しています。



図7 位相検出回路

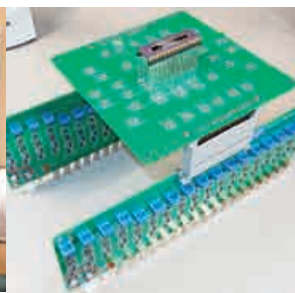


図8 プリアンプ回路

中央部品室

中央部品室では、実験でよく使用される真空・配管部品や、回路工作で使う電気・電子部品などをあらかじめ在庫しており、簡単な手続きで入手することができます。24時間部品を出庫することが可能で、急に必要になった部品も中央部品室で入手することができます。多くの研究者・技術職員(ユーザー)の多種多様な部品在庫要望に応えるため、室内は棚がたくさん並んだ倉庫のようです(図9)。中央部品室で取り扱う部品は、約1,400種類ありますが、それら在庫品の種類・仕様を一堂にまとめたホームページを作成して利用者の利便性を高めました。また、ユーザの意見を取り入れながら在庫品の新規追加や機能・型式が古くなった在庫品の廃止・入れ替えを行っています。今から20年ほど前に出庫手続きを紙面からコンピュータ化し、運用の効率化と便宜性の向上を図り、現在まで運用しています。



図9 中央部品室

おわりに

機械工作室や回路工作室では、昨年度は合わせて約150件の製作依頼を受け対応しました。所内、共同研究者の製作依頼や技術相談は、技術部製作技術課までお願いします。

(製作技術課 課長)

令和3年度市民説明会の中止に関して

核融合科学研究所は、新型コロナウイルス感染拡大を受けた岐阜県の緊急事態宣言が9月30日まで延長されたことに伴い、9月に開催を予定していました今年度の市民説明会を中止としました。なお、市民説明会で予定していました内容をQ&A形式でまとめ、ホームページ (<https://www.nifs.ac.jp/pr/briefing/faq.html> または右記QRコード) に掲載していますのでご覧ください。



第23サイクルのプラズマ実験を開始

核融合科学研究所は、2021年10月14日より、大型ヘリカル装置（LHD）の第23サイクルのプラズマ実験を開始しました。「サイクル」とは、数か月間連続してプラズマ実験を行う期間のことで、今回は、1998年（平成10年）の実験開始から数えて、23回目の実験期間になります。

LHDでは、第19サイクルから、重水素を用いて高温のプラズマを生成する「重水素実験」を行っています。昨年度の第22サイクルにおいては、イオン温度と電子温度が共に1億度を超える核融合炉級プラズマの実現に成功し、研究は新たな段階に入りました。今年度の第23サイクルにおいては、高温プラズマの制御のために、乱流やプラズマ中に発生する波のメカニズムを明らかにすること等、核融合発電を実現する上で必要な学術研究を中心に進めます。また、核融合研究で得られた知見を天体現象などの理解のために普遍化する新たな研究の展開も図る予定です。

第23サイクルのプラズマ実験は、2021年10月14日から2022年1月21日まで重水素実験を実施し、その後、2月17日までの終盤の約1か月間は、軽水素とヘリウムガスをを用いた実験を実施する予定です。

小林達哉助教が「2021 IUPAP Young Scientist Award in Plasma Physics」を受賞

本研究所高温プラズマ物理研究系の小林達哉助教が、「2021 IUPAP Young Scientist Award in Plasma Physics」を受賞しました。この賞は、国際純粋・応用物理学連合（The International Union of Pure and Applied Physics）より、特筆すべき成果を残した若手物理学者に授与されるものです。「核融合プラズマにおける電場と帯状流の励起機構の同定、および乱流輸送抑制の原理解明に大きく貢献した。」ことが評価されました。



LHD消火訓練を実施

核融合科学研究所は、土岐市南消防署の協力を得て、令和3年度の大規模ヘリカル装置（LHD）の消火訓練を10月15日に実施しました。今年度も、新型コロナウイルス感染防止対策を徹底して行い、所内から約150名の実験関係者が参加しました。

訓練は、プラズマ実験中にLHD実験棟本体室内の装置から、小規模な火災が発生したという想定の下、危機管理指揮本部を立ち上げて実施しました。自衛消防隊地区隊本部が置かれた制御室では、地区隊長の指示により、安全確保や装置停止など非常時の措置をとり、また、模擬出火現場の本体室では、職員で構成した地区隊現場対応班が、初期消火活動等を迅速に行いました。訓練は危機管理指揮本部長の終了宣言により、予定どおり終了しました。



模擬出火現場での初期消火活動を行う自衛消防隊員