

NIFS NEWS

No 261

2021 August / September

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



総研大・核融合科学専攻「夏の体験入学」の現地参加学生と担当教員との集合写真

特集 P2 - P3

総研大・核融合科学専攻「夏の体験入学」
後藤基志

研究最前線 P4 - P5

レーザー誘起周期的ナノ構造の形成機構に
関するシミュレーション 坂上仁志

特集 P6 - P7

総研大 - サンクトペテルブルク工科大学
合同夏の学校 田村直樹

オンラインイベント「対話×科学」

芦川直子

トピックス P8

- ・核融合科学研究所 市民学術講演会
- ・オンライン開催のご案内
- ・核融合エネルギー研究推進基金のご支援
のお願い
- ・リサイクル募金のご願い

総研大・核融合科学専攻「夏の体験入学」

後藤基志

2021年8月23日から27日までの5日間の日程で、核融合科学研究所（以下、NIFS）において、「夏の体験入学」を開催しました。

NIFSに併設されている国立大学法人 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（以下、本専攻）では、2004年から毎年「夏の体験入学」を開催しています。「夏の体験入学」は本専攻の志望者獲得を第一義的な目的とし、更に、将来の核融合エネルギーの実現に向けた人材育成、社会への情報発信・広報等を重要な位置付けとして、大学の1年生から4年生、及び高等専門学校4、5年生と専攻科生を対象に行ってきました。

18回目となる今年は、10課題で参加学生を募集したところ33名からの応募があり、開催に向けた準備を順調に進めていましたが、第5波の新型コロナウイルス（COVID-19）感染拡大が全国規模で発生したため、当初予定を大幅に変更することになりました。最終的に、夏季短期インターシップのため前週から既にNIFSに滞在していた学生2名を除く全ての学生の現地受け入れを断念しました。担当教員の努力により3課題についてはオンライン課題へと変更することができたため、現地の2課題と合わせた5課題を実施し、現

地2名、オンライン11名での開催となりました。実施が見送られた5課題に配属されていた20名の学生には、今年度の参加を諦めてもらわざるを得ず、大変心苦しい結果となりました。ぜひ来年度に参加してもらいたと思います。

核融合科学を構成する研究分野は、プラズマ物理学、原子物理学、電気工学、低温・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多岐にわたり、本専攻にはその各分野を専門とする教員が揃っています。今回の体験入学では、プラズマ実験・加熱・計測系、核融合工学系・自然科学系からそれぞれ1課題、解析・理論・シミュレーション系から3課題の計5課題が実施されました（表1）。解析・理論・シミュレーション系の3課題は今回初めて、オンラインで実施しました。

体験入学の1日目は、専攻長である吉田善章所長の挨拶に始まり、各研究課題のテーマ概要説明が担当教員からなされるとともに、各参加学生は自己紹介を行いました。その後、現地参加者は大型ヘリカル装置（LHD）の実験設備、並びにシミュレーション施設の見学を行いました（写真1）。参加した学生は、世界有数の研究設備を目の当たりにして核融合科学への興味を深めている様子でした。

実習が行われる2日目から4日目までは、毎日朝礼で前日の実習内容や感想の報告を各課題につ

プラズマ実験・加熱・計測系
分光システムの較正と太陽スペクトルの解析
核融合工学・自然科学系
真空システムを用いた水素同位体の金属内移行現象の観察
解析・理論・シミュレーション系
LHD プラズマで生じる揺らぎの時系列データ解析
複雑性を有するプラズマ現象の粒子シミュレーション研究
機械学習を用いたイメージングポロメータ用薄膜検出器の特性評価

表1 夏の体験入学実施課題



写真1 施設見学の様子



写真2 実習の様子

いて行き、朝礼後、配属された課題実習に取り掛かりました。参加学生は皆、担当教員が実際に取り扱っている実験機器や計算機を用いて、専門的な研究課題に熱心に取り組んでいました（写真2）。2日目の午前中に、副専攻長の榊原悟教授による特別講義（写真3）があり、参加学生は、研究開発が進められている核融合発電の原理、LHDに代表される磁場閉じ込め核融合プラズマ研究の概要や研究課題、核融合研究の歴史などについて学びました。2日目の課題実習終了後、研究者へのキャリアパスに関心のある学生を対象に、キャリアビルディングをテーマとした座談会をオンラインで開催しました。本企画は任意参加でしたが、ほぼ全ての学生が出席し大盛況でした。NIFSの若手研究者2名をパネリストに迎え、こういった道筋を経て核融合科学の研究者になったのか、研究者になるために大事なことは何かなど、いくつかのテーマでパネリストの経験に基づく発表と、それに対する学生との質疑応答が行われました。学生にとっては、研究内容に関することから私生活に至るまで、研究者から直接話を聞く機会が得られ、将来を考える上で大変参考になったようです。



写真3 榊原副専攻長による特別講義の様子

最終日5日目の発表会では、参加学生、課題担当教員及び夏の体験入学関係者が参加して、発表時間10分・質疑応答5分の口頭発表を行いました。学生たちは、苦労して仕上げた発表資料をもとに、実習の詳しい内容の説明を行いました（写真4）。結果だけでなく体験を通して学んだことも生き活きと発表し、質疑応答にも堂々と答えていて、研究発表のレベルの高さに感心させられました。発表会の後、榊原悟副専攻長からの専攻紹介及び入学案内があり、次いで開催された閉校式における吉田善章専攻長からの挨拶をもって、全日程を終了しました。

最終日に参加学生が提出した夏の体験入学についてのアンケートからは、本事業への満足度が大変高いことがうかがえ、COVID-19の感染拡大情勢の中、夏の体験入学が開催されたことに感謝する学生もいました。また、ここ数年、過去に夏の体験入学に参加した学生が本専攻を受験しており、総研大の広報事業としての成果が目に見えるようになってきています。夏の体験入学に参加した学生の中から、数年後、将来の核融合科学研究を担う研究者が現れてくれることを期待しています。なお、これまでの夏の体験入学の課題概要や参加学生の体験談などを本専攻のホームページ (<https://soken.nifs.ac.jp/open/>) で公開しています。

最後に、夏の体験入学は、総研大の「新入生確保のための広報的的事业」及び特定非営利活動法人核融合科学研究会からのご支援により実施することができました。ここに厚く御礼申し上げます。

(高温プラズマ物理研究系 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)



写真4 成果発表会の様子

レーザー誘起周期的ナノ構造の形成機構に関するシミュレーション

坂上仁志



はじめに

物質表面に非常に強力なレーザーを照射すると、レーザーのエネルギーが物質に吸収されて、その表面はプラズマ化します。そのように強力で、かつ光が僅か0.01ミリメートルしか進まない程の100兆分の3秒という極短い時間のレーザーパルスで金属表面に何度も繰り返し照射すると、周期的で微細な構造が、種も仕掛けもないにもかかわらず自発的に形成されます。この微細構造の格子間隔は、1マイクロメートル（マイクロはミリの1,000分の1）以下であるため、一般にはナノ構造（ナノはマイクロの1,000分の1）と呼ばれており、多くの工学的応用が期待されています。例えば、このナノ構造を摺動（しゅうどう）機械部品の表面に作成できると、金属部品同士の摩擦が低減されて製品の高効率化や長寿命化につながります。また、金属表面への塗料を用いない着色や強い撥水性の付加などの高機能化も期待されています。

この現象は、多くの実験により報告されており、ナノ構造がどのように形成されるかについても、多くの形成機構が提案されていますが、まだ完全には解明されておらず未知なことも多いため、2

次元電磁粒子コードのシミュレーションにより、その形成機構を解析しました。

電磁粒子コード

レーザーによる物質のプラズマ化では、様々な分子・原子過程や衝突緩和過程等を介して電離／再結合が起こるので、電離度の異なるイオンが共存し、かつ個々のイオンの電離度そのものも時間的に変化してしまいます。このため、このプラズマ化の過程を厳密に再現し、周期的ナノ構造の形成をシミュレーションすることは、計算が余りにも複雑になってしまうため現実的ではありません。しかし、強力なレーザーの照射によって金属表面にプラズマが生成され、そのプラズマとレーザーの相互作用が周期的ナノ構造の形成に重要な役割を果たしているのなら、最初から理想的なプラズマ状態であると仮定した解析でも、その物理現象のエッセンスは解明できると考えられます。このような解析のための強力な手法が、電磁粒子コードを用いたシミュレーションです。

さて、電磁粒子コードでは、荷電粒子である電子及びイオンの運動と電場及び磁場の時間発展をすべて自己無撞着（じこむどうちゃく）に扱って、膨大な数の荷電粒子を用いてシミュレーションを行います。また、電場及び磁場は、空間格子を系に導入して、その格子点上でのみ定義します。次に説明するシミュレーションでは、典型的な値として、40×7マイクロメートルの真空領域のX軸方向の中央に12×7マイクロメートルの金属の表面に生成されたプラズマ状態を模擬したプラズマを導入し、全体を2,000×360の空間格子で表現して、電子とイオンの合計で4千万個の荷電粒子を用いています。0.5ピコ秒（ピコはナノの1,000分の1）までのシミュレーションをするためには、少しずつ時間を進める計算を19,000回繰り返すことが必要になりました。

シミュレーション結果

まず、レーザーの電場が振動する方向である偏光面が2次元シミュレーション空間に平行なレーザー（P偏光レーザー）を入射したときの様子を

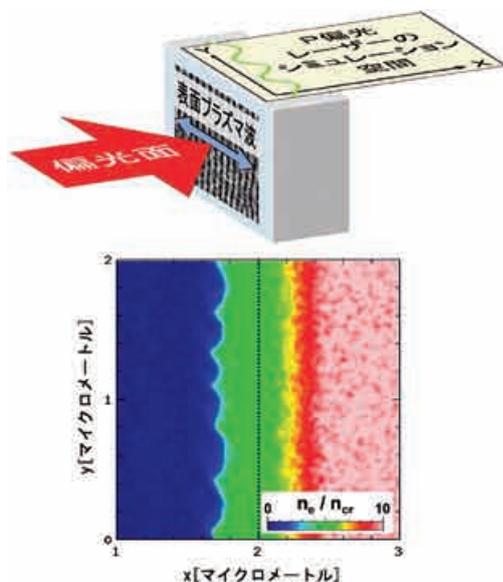


図1：P偏光レーザーの様子（上）と電子密度（下）

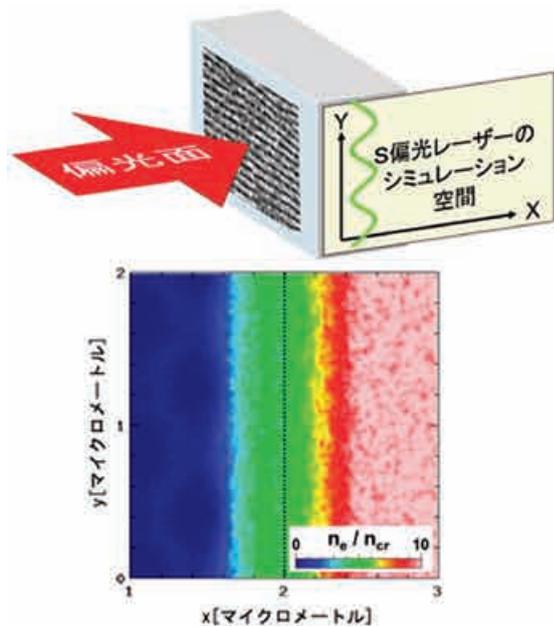


図2：S偏光レーザーの様子（上）と電子密度（下）

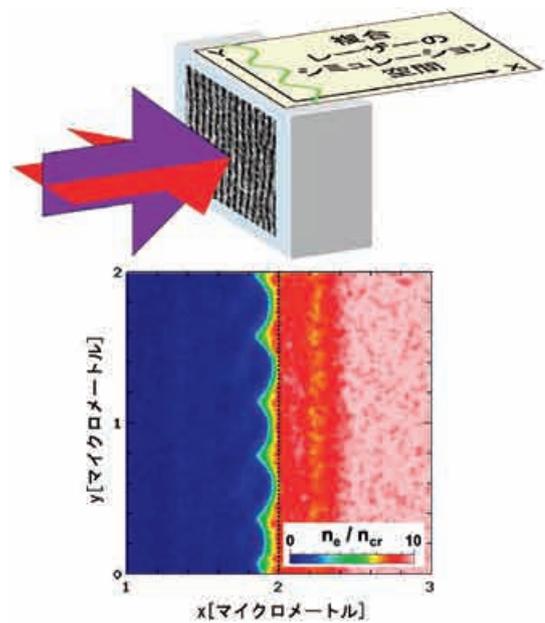


図3：複合レーザーの様子（上）と電子密度（下）

図1上図に示します。このとき、シミュレーション空間上に緑の波線で示されたような周期的な突起が形成されたとすると、実際には、シミュレーション空間とは垂直な方向に一樣な溝構造が形成されたことを意味します。波長800ナノメートルのP偏光レーザーを左から入射したときの0.35ピコ秒後における電子密度 (n_e) 分布を図1下図に示します。なお、 n_{cr} はレーザーがプラズマ中に侵入できなくなる密度であり、臨界密度と呼ばれています。また、初期の金属表面の位置を点線で示しています。金属を模擬したプラズマから噴き出したプラズマ部に周期的な突起が生成されていることがわかります。このシミュレーション結果を解析し、レーザー電場により直接励起された表面プラズマ波と、その結果として誘起される不安定性などにより周期的ナノ構造が形成されるという、新しい形成機構を示すことができました。次に、レーザーの偏光面がシミュレーション空間に垂直なレーザー（S偏光レーザー）の場合を図2上図に示します。このとき、シミュレーション空間上の構造は、レーザー偏光面に平行な溝構造となります。同様に電子密度分布を図2下図に示しますが、このとき構造は生成されませんでした。これら二つのシミュレーション結果は、実験における周期的ナノ構造が、レーザー偏光面に対して直交することに対応しています [1]。更に、波長800ナノメートルのP偏光レーザー（赤矢印）と400ナノメートルのS偏光レーザー（紫矢印）を同時に入射した場合を図3上図に、電子密度分布を図3下図に示します。2本のレーザーでプラズマを

押すので、あまりプラズマは噴き出していません。P偏光レーザーだけの場合より規則正しく、かつ間隔が少し長い周期的ナノ構造が、波長800ナノメートルのレーザー偏光面に垂直な方向に形成されていますが、これは、実験と同様の結果です [1]。シミュレーション結果を解析したところ、レーザーフィラメンテーションと呼ばれる自己形成されたレーザー電場の空間的強弱分布が、このときの周期的ナノ構造の形成に重要な役割を果たしていることがわかりました。

おわりに

ナノ構造形成のようなレーザー加工を完璧にシミュレーションするためには、物質のプラズマ化を始めとして種々の複雑な物理現象を総合的にシミュレーションしなければならず、困難を極めます。しかし、物質がプラズマになる過程は重要ではなく、最初から「理想的なプラズマありき」と仮定しても十分妥当性があるなら、電磁粒子シミュレーションを用いて興味のある物理現象を再現でき、多くの有用な知見を得ることができると考えられます。

なお、本研究成果は、京都大学化学研究所の橋田昌樹准教授との共同研究によるものです。

（基礎物理シミュレーション研究系 教授）

参考文献

[1] M. Hashida, Y. Furukawa, S. Inoue, S. Sakabe, S. Masuno, M. Kusaba, H. Sakagami, and M. Tsukamoto, *J. Laser Appl.* 32, 022054 (2020)

総研大-サンクトペテルブルク工科大学 合同夏の学校

田村直樹

総合研究大学院大学（総研大）・核融合科学専攻では、一昨年度からロシアのサンクトペテルブルク工科大学（SPbSTU）と合同でプラズマ・核融合に関する夏の学校を開催しています。昨年度からは、国際原子力機関（IAEA）も共催として加わっています。一昨年度は現地のSPbSTUで開催しましたが、昨年度は新型コロナウイルスの感染拡大の影響によりウェブ会議システムを使用した完全オンライン形式で開催しました。今年度は再び現地のSPbSTUでと検討していましたが、残念ながら、新型コロナウイルスの感染拡大が未だ終息する気配を見せていないため、引き続きウェブ会議システムを用いた完全オンライン形式で開催しました。今年度より、従来の講義形式のモジュール（以下、講義モジュール、2021年7月12日から21日まで開催）に加えて、各研究トピックに精通した研究者らによる最近の研究成果を紹介するセミナー形式のモジュール（以下、セミナーモジュール、2021年7月26日から30日まで開催）も開催しました。今年度は、両モジュール合わせて、アメリカ、イラン、インド、オーストラリア、中国、ロシアの計6ヶ国より、学部生から博士課程学生まで様々なバックグラウンドを持った合計28名の学生が聴講しました。

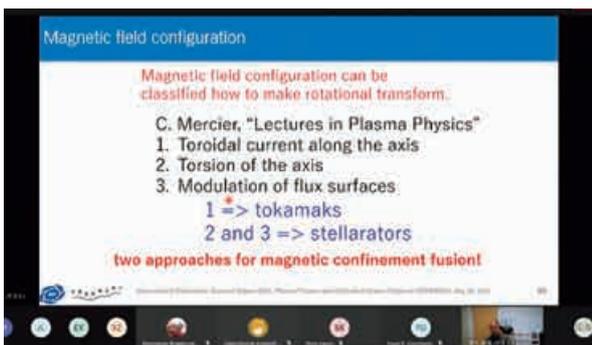
講義モジュールでは、SPbSTUのPavel Goncharov 研究員、IAEAのMatteo Barbarino氏、総研大担当教員の齋藤健二准教授、佐竹真介准教授、鈴木康浩准教授と筆者の合計6名が講師として講義を行いました。Barbarino氏からIAEAにおける核融合に関する活動についての紹介があり、Goncharov

研究員よりプラズマから磁場閉じ込め核融合に至るまで幅広く基礎的な講義が行われました。齋藤准教授はイオンサイクロトロン共鳴によるプラズマ加熱について、佐竹准教授はプラズマ輸送について、鈴木准教授は磁場閉じ込め核融合と電磁流体力学的不安定性について、筆者は総研大の紹介を含めて、日本における核融合研究の現状及びプラズマ分光について、専門的な講義を行いました。セミナーモジュールでは、合計11の研究トピックに対してSPbSTU、ロシアのヨッフエ物理学技術研究所及びクルチャフ研究所、IAEA、核融合科学研究所（NIFS）、総研大からそれぞれ講師が招かれました。NIFSからはSiryaporn Sangaroon 特任研究員が中性子計測について、渡邊清政教授が電磁流体力学について、総研大担当教員の居田克巳教授がビーム分光法について、筆者がプラズマ中の不純物輸送に関する最新の研究成果について紹介しました。

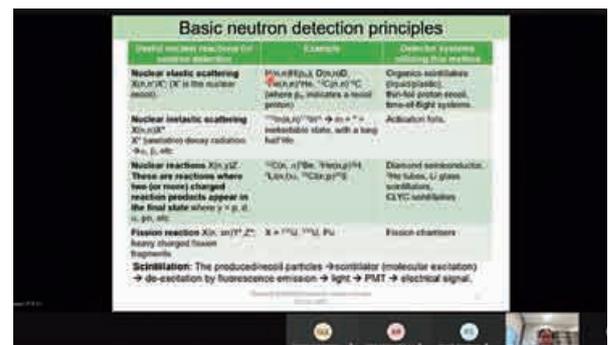
完全オンライン形式のため、参加した学生との質疑応答は、ウェブ会議システムを通して直接行われた他、より詳細な回答がチャット機能を使って講師より学生に送信されるなど、オンライン講義ならではの光景も見られました。参加した学生からは、総研大・核融合科学専攻に大変興味を持ったといった意見が寄せられており、今後このような学生たちが総研大・核融合科学専攻に志願し、入学してくれることを願っています。

総研大・核融合科学専攻とSPbSTUとの合同夏の学校は来年度も引き続き開催する予定です。

（高温プラズマ物理研究系 准教授）



講義モジュールの様子（講師：鈴木准教授）



セミナーモジュールの様子（講師：Sangaroon特任研究員）

オンラインイベント「対話×科学」

芦川直子

2021年6月19日（土）にオンラインイベント「対話×科学」を開催しました。現在のCOVID-19禍に伴う社会情勢を鑑み、これまでの市民学術講演会やFusionフェスタといったオンラインサイトのイベントで実施されてきた講師から聴衆への講演という通常の形式とは異なり、事前に抽選で選出した一般の方（質問者）と専門家（パネラー）によるZoomを使った対話形式のイベントとして実施しました。また、その模様はYouTubeを通じて配信され、事前申込みした聴講者と共有しました。今回設定した話題及びパネラーは、1）核融合発電から持続可能な社会への貢献（芦川直子）、2）水素化社会と超伝導テクノロジー（平野直樹）、3）国際プロジェクト（ITER）から核融合エネルギーの実現へ（大前敬祥（ITER機構））の3件で、司会進行は核融合科学研究所の横山雅之が行いました。イベントへの最終的な参加人数は、一般からの質問者が11名、YouTubeからの聴講者は約150名でした。

世界ではカーボンニュートラルに向けた方針が目まぐるしく変化するとともに、核融合発電に向けた研究推進への期待値が高まりつつあります。また、オンラインイベントの利点の一つとして、遠方からの講演者の参加が容易であるという点が挙げられます。近年、一般向けの科学講演の多くは、持続可能な社会に対する自身の研究分野の貢献を明記する傾向にあります。これら時事的な背景も考慮し、前述の3つの話題を選定しました。特に、ITERの話題については、フランス現地で仕事をされているITER機構首席戦略官である大前氏からパネラーとしての参加の快諾を得ました。

イベント中に若干の接続トラブルはあったものの、イベント全体を通じてスムーズな進行であったと思います。ITERに関する数多くの質問に対し、大前氏は最新のITER装置の組み立て状況を写真と共に紹介し、多くの聴衆がフランスからの風を感じつつその解説を楽しみました。約半数の質問者から顔出しを了承いただき、これはYouTubeで聴講した方にとってリアリティを感じることにつながりました。回収した事後アンケ

ートの内容からも、良好な印象でイベントが終了したことを確認することができました。

初期にWEB上へ掲載したイベント案内では、大前氏の項目で「日本の研究者がまだ知らない情報を、誰よりもいち早く聞くことができるかもしれません」という文章を掲示しました。実際に、イベント中の対話内容は、ITERの最新の建設状況や米欧で進められている多数の核融合発電ベンチャーの話題、カーボンニュートラルに向けて着目される水素エネルギー開発事情に至るまで、研究者にとっても最先端の話題が多く、イベントは大変盛り上がりました。イベント内で回答した質問以上に多数の質問があり、それらはイベントのWEBサイトに回答集を作成しました。詳細は是非回答集を見ていただきたいのですが、聴衆の皆さんが核融合発電について日頃ご興味をもっていた上で核融合発電の実現に必要な課題について質問していただいたことが分かる内容になっています。このように本イベントの主役である一般聴衆の皆さんからいただいた多数の良質な質問によって、最先端の話題で皆さんが楽しく過ごすイベントになりました。

本イベントのWEBサイト、及び当日のYouTube動画は下記のアドレスに公開されておりますので、ぜひご覧ください。

<https://www.nifs.ac.jp/welcome/fusionfesta/index.html>

<https://www.youtube.com/watch?v=ghD79YWykQk&t=4671s>

（核融合システム研究系 准教授）



当日のオンラインイベント配信の様子

核融合科学研究所 市民学術講演会 オンライン開催のご案内

核融合科学研究所は、11月27日（土）に市民学術講演会をオンラインで開催します。九州大学大学院薬学研究院の西田基宏教授から「COVID-19治療薬開発に向けた取組み」と題して、新型コロナウイルスに関する治療薬開発や重症化・後遺症の予防・治療を見据えた最新の研究成果の話をしていただく予定です。また、本研究所の吉田善章所長が「核融合科学のチャレンジ」と題して、核融合科学の研究から生まれた発見に関する紹介を交え、難しくも楽しい研究現場についてお話する予定です。事前申し込みは不要で、オンラインによる無料の動画ライブ配信にて実施いたします。当日の参加方法については、ホームページ(<https://www.nifs.ac.jp/shiminkouen/2021/>)または右記QRコードからご確認ください。



核融合エネルギー研究推進基金のご支援のお願い

核融合科学研究所は、創立30周年を契機に研究所の未来に向けた取組みの一つとして、「核融合科学研究所核融合エネルギー研究推進基金」を創設しました。

本基金は、個人及び法人の皆様からの篤志による寄附金を原資として、核融合研究を推進するための人材育成事業や、地域・産学等連携支援事業、研究環境等の一層の充実を図る施設等整備事業、研究成果等を社会に発信するアウトリーチ活動等を行うことを目的としております。

皆様方におかれましては、引き続き格別のご支援を賜りますようお願い申し上げます。

核融合エネルギー研究推進基金へのご寄附は、写真右下のQRコードからお願いします。



小学生を対象とした科学イベント



リサイクル募金のお願い

核融合科学研究所リサイクル募金は、皆様から読み終えた本・DVD・ブランド品等をご提供いただき、その査定換金額が核融合科学研究所に寄附される取組みです。

寄附金は、上記核融合エネルギー研究推進基金として寄附され、同様の目的に役立てられます。皆様からのご支援、ご協力をお待ちしております。

リサイクル募金へのお申し込みは、右記QRコードからお願いします。

