

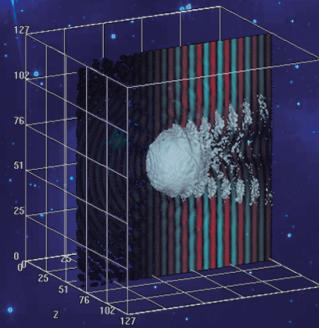
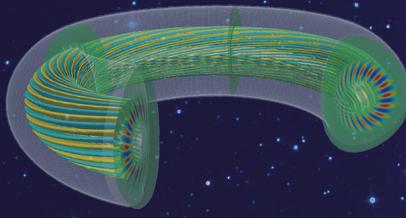
非線形・非平衡 プラズマ科学 研究ユニット

一分野を横断した次世代プラズマ科学の探求

京都大学学際融合教育研究推進センター

Annual Report 2024

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \gamma_L N - \gamma_{NL} N^2 - \alpha_1 U^2 N - \frac{\beta}{\beta'} \alpha_2 G^2 N - \frac{\beta \beta_2}{\beta' \beta'_2} \alpha_3 V^2 N$$
$$\frac{\partial U}{\partial t} = -\frac{1}{2} \gamma_{damp} U + \frac{1}{2} \alpha_1 U N - \beta G$$



CONTENTS

- ごあいさつ
 - ユニットについて
 - 2024年度ユニット活動
 - プラズマ科学セミナー
- Prof. Deliang Yu (Southwestern Institute of Physics)
岩田 夏弥 教授 (大阪大学レーザー科学研究所)
樋田 美栄子教授 (核融合科学研究所)
- 【コラム】「ゼロエミッションエネルギー」研究拠点とは?
- メンバー一覧

ごあいさつ

本ユニットは令和2年2月の発足以来、「プラズマ」を学術基盤としてその多様性と複雑性を理解し応用しようとする研究者の活動を部局や研究分野の枠を越えて推進しようと、今年度で5年間にわたり活動を続けて参りました。この間、代表部局であるエネルギー科学研究所の国際先端エネルギー科学教育センターと密接な連携・協力関係の下、核融合プラズマ、光量子・基礎プラズマ、非線形・非平衡プラズマ数理の各研究領域を設定し、プラズマ科学セミナーを通して研究領域間の連携交流の場を設けるとともに、ユニットを通して量子科学技術研究開発機構(QST)量子エネルギー部門とのオンラインラボ共同研究への参加や、中国西南物理研究所(SWIP)核融合科学センターとMOU(学術研究協力協定)を締結、同研究所のトカマク装置HL-2A、HL-3を用いた国際共同研究の実施なども行ってきました。このように、本ユニットの活動の幅が広がってきてているのも、ひとえにユニットメンバーの方々のご協力のお陰であると感謝しております。

一方、昨年度来の京都大学学際融合教育研究推進センターにおけるユニット内規の変更ならびに部局行動計画を受けて、設置期限である令和8年3月31日を目処に一旦本ユニットを終了し、新たな形での継続発展を考えてゆくこととなります。特に現在、ムーンショット目標10として「2050年までに、フュージョンエネルギーの多面的な活用により、地球環境と調和し、資源制約から解き放たれた活力ある社会を実現」が制定され、本ユニットメンバーのほとんどがその専門分野から個々のプロジェクトを推進すべく、プロジェクトへの公募や、一部採択されたプロジェクトの実施に関与してきており、目標達成のためにも今後、より異分野間連携が重要になってきております。このような状況を踏まえ、今後のユニット活動のあり方の検討もご議論いただき、ユニット活動の更なる広がりに、ぜひ皆様のお力添えを賜りたいと存じます。

ユニット長 田 中 仁

核融合プラズマ研究領域

超伝導トカマクJT-60SA（QST・日欧）の完成(2020)およびITER（国際熱核融合炉）の完成（2025）と核融合プラズマ実験研究の進展

臨界プラズマ実験装置
JT-60 (1985-2008)

自己組織化による高性能プラズマの実現
(謝辞: 那珂研究所)

超伝導トカマク型実験装置
JT-60SA (2020 完成)

ITER (2025完成予定)

<https://www.qst.go.jp/site/jt60/5150.html>

数値トカマク核融合実験
GKNET (京都大学)

トカマク中の乱流構造

光量子・基礎プラズマ研究領域

超高強度レーザーによる極限状態の高エネルギー密度プラズマの生成と応用研究（実験室宇宙物理・医療応用などの展開）

J-KAREN (QST)

ELI (EU)

G. Mourou
D. Strickland
CPA 極短パルスレーザー
2018年ノーベル物理学賞

数値光量子プラズマ実験
EPIC (京都大学)

放電過程の自己組織化

相対論領域のイオン生成

<https://www.qst.go.jp/site/kansai-dapr/>

<https://eli-laser.eu/>

非線形・非平衡プラズマ数理研究領域

非線形・非平衡性が本質的役割を果たす物質科学・ナノ工学・生命・生物・バイオ科学、数理科学分野における理解の進展と異分野間連携

蛋白質の折り畳み（自己組織化）
(謝辞: 木下 (京大))

大域的なエントロピーバランス

プラズマ乱流の時間空間構造

惑星の大気・気象現象 (NASA)

$$\frac{\partial}{\partial t} \int s^{(1)} dZ^4 + \frac{\partial}{\partial x} \int v_x s^{(1)} dZ^4 = G(x)$$

0: 中心 Q_0 半径 a (表面) T_h T_c F

非線形・非平衡プラズマ科学研究ユニットについて

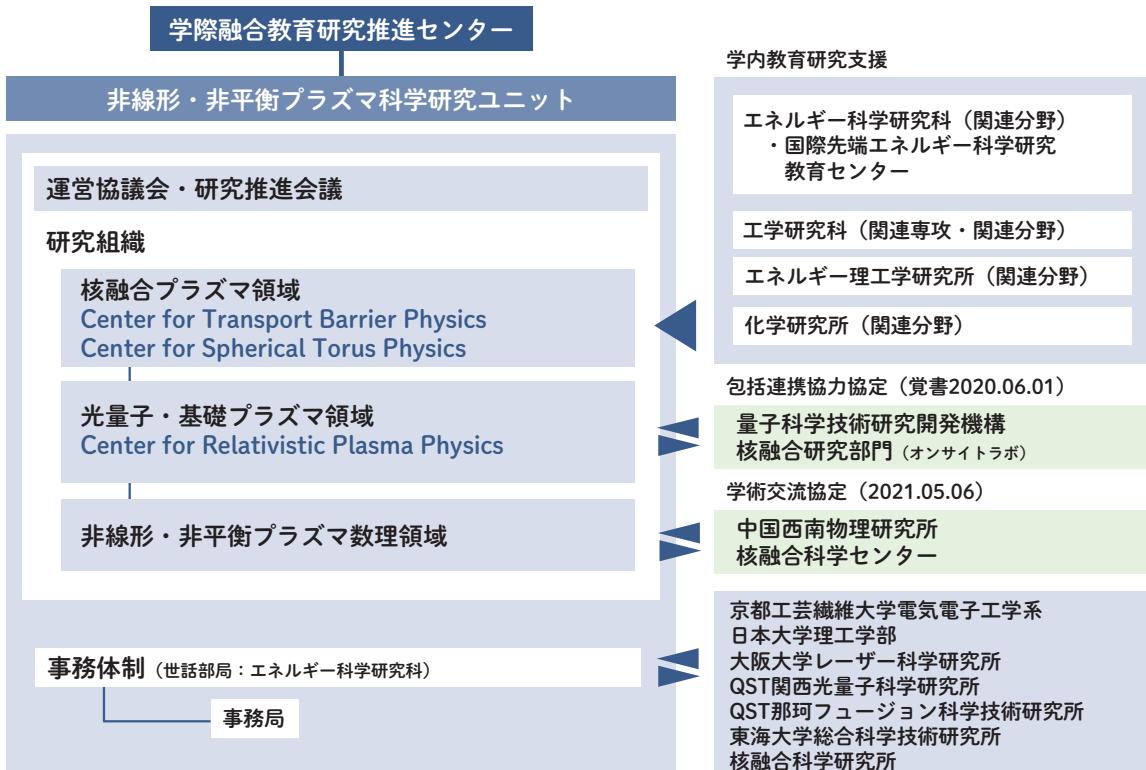
ユニットは、京都大学における多様なプラズマ研究の歴史と実績を背景に、幅広い時空間スケールの非線形性や非平衡性に支配されるプラズマ現象を対象に、同様の過程が重要な役割を果たす物質科学や生命・生物科学、数理科学や情報・計算科学など、異分野の研究者との積極的な連携・協力を通して幅広い知識や知見を共有することにより、複雑性と多様性に満ちたプラズマの学理と応用を分野横断的・俯瞰的に探究する研究活動を展開することを目的とします。これにより次世代を担う高性能で高機能なプラズマ創成の新しい研究のアプローチや方法論を開拓するとともに、それらを牽引する人材育成に貢献します。

3つの研究領域

安全性が高い恒久的なエネルギー源の実現を目指した「核融合プラズマ研究」、近年急速に発展している高強度レーザーを利用することで新領域の学術・応用研究の実現を目指した「光量子・基礎プラズマ研究」、それらの学術基盤である「非線形・非平衡プラズマ数理研究」の3つの領域をユニットに設定しています。

ユニットの組織構成

京都大学学際融合教育研究推進センターのもと、エネルギー科学研究科を担当部局として設置されています。プラズマを含む幅広い先端エネルギーに関する国際共同利用研究を推進する同研究科国際先端エネルギー科学研究センターとも連携しつつ、研究領域を横断する緩やかな連携を図ることを目的とした研究推進会議を設けています。



2024年度ユニット活動

核融合プラズマ研究領域

2023年10月に英国ロンドンで開催された第29回IAEA核融合エネルギー会議（FEC）において議論された核融合ベンチャーの世界的な潮流も含め、様々な研究の進展を背景に、2024年度多くの展開がありました。その一つとして、総合科学技術・イノベーション会議において、核融合エネルギーがムーンショット型研究開発の10番目の目標に設定され（MS10）、それに関する応募が6月上旬にあり、その後の審査を経て10月中旬に結果が公表されました。MS10は2050年までに「フェュージョンエネルギーの多面的な活用により、地球環境と調和し、資源制約から解き放たれた活力ある社会を実現」を目指すものであり、全47件の応募があり採択されたのは3件と狭き門でしたが、社会の核融合エネルギー実現を期待する現れであるといえます。これら活発化した核融合研究の展開を背景に、本ユニットの核融合プラズマ領域においても様々な展開がありました。

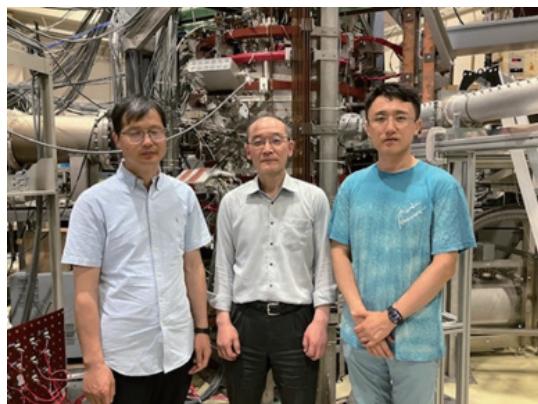
中国西南物理研究所との共同研究

本ユニットは2021年（令和3年）5月に中国西南物理研究所（SWIP）核融合科学センターとプラズマ物理・核融合科学／核融合工学・技術／先進エネルギーシステム材料の関連研究促進に関する学術交流協定に関するMOUを締結しましたが、それから4年が経過し、この間、同研究所とは活発な交流が行われています。2024年6月には、同研究所の輸送実験研究のリーダーを担当するDeliang Yu教授と乱流輸送理論・シミュレーション研究を担当するWei Wang副研究員が本ユニットと核融合科学研究所（NIFS）を訪問されました。本件は、本ユニットとSWIPの調整を経て、日中政府間会合JWG（2023年度）「Study of ITB mechanism through joint experiments -simulation research」に関する共同研究を提案・採択されたことによるものであり、SWIPで新たに稼働したトカマクであるHL3（2020年度報告書P11参照）を用いた内部輸送障壁（ITB）に関する共同研究を予定しており、同年4月には関連した基礎実験に岸本が参加した経緯があります。4月時点ではHL3は接線NBI（1.5MW）、ECRH（1.6MW）、および、LH（0.5MW）が稼働状態にあり、現在2024年12月時点では2番目のNBIが準備されています。Yu教授とWang

副研究員は今回の訪問時にも今年度後半の実験キャンペーンに向けてITB形成と物理機構の解明に向けた実験を予定しています。

この訪問において、6月10日（月）には京都大学宇治キャンパス（北4号棟）で、長崎百伸教授・稻垣滋教授（エネルギー理工学研究所）らが実験研究を進めているHeliontron Jグループと合同でユニットセミナー（Center for Transport barrier Physics内企画）を開催し、Yu教授からHL3の計測系の現状と今後同装置を用いた重水素・三重水素（DT）の燃焼プラズマ実験に向けた検討状況について講演をいただきました。6月11日（火）には北部キャンパスの先端エネルギー科学実験棟で、田中仁教授・打田正樹准教授（京都大学エネルギー科学研究科）らが進めている球状トカマクLATEを訪問し、関連実験研究を主導している田中仁教授と議論、6月12日（水）には核融合科学研究所（NIFS）を訪問し、LHD装置を用いたプラズマの分布拘束とITB形成の物理機構を目指した乱流輸送実験に参加、6月13日（木）にはNIFS可視化センシングユニットのユニットセミナー（受入担当：田中謙治教授）において、Yu教授が「HL3トカマクにおける計測開発と燃焼プラズマ実験の展望」のタイトルで講演を行いました。HL3による燃焼実験は第29回IAEA-FEC会議においてもオーバービュー講演で

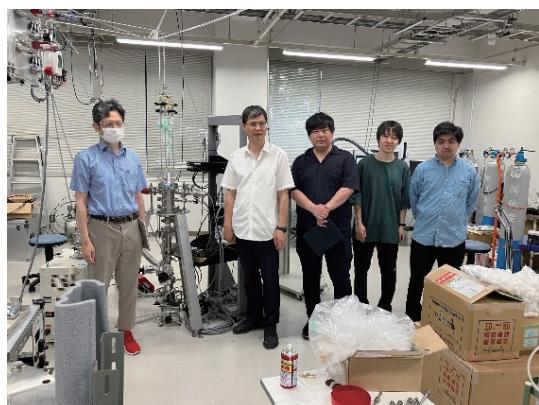
Min Xu教授（SWIP所長）が公表したものですが、それが実行に移されてことが分かりました。



京都大学の球状トカマク LATE を訪問・見学
(左より Yu 教授、田中教授、Wang 副研究員)

6月14日（金）には、Yu教授とWang副研究員の両名は比村治彦教授・三瓶明希夫准教授（京都工芸繊維大学プラズマ基礎工学研究室）を訪問し、同教授等が進めている低アスペクト比逆磁場ピンチ（RFP）プラズマであるRELAXの研究プロジェクトについての説明を受けました。REALXは最近トカマク放電もできるように改造されており、今後、HL3などのトカマクとの連携が期待されます。

Yu教授らの訪問では、ユニットのネットワークを活用して、多くの訪問や研究議論を行うことができました。受け入れてくださったユニット構成員の皆様に深く感謝申し上げます。また、今回の交流は実り多いものであり、今後の共同研究のさらなる発展が期待されます。（SWIPとの協力研究は2020年度（令和2年度）報告書p11を参照下さい。）



京都工芸繊維大学比村研究室訪問時の様子

Center for Transport Barrier (TB) Physics セミナーの実施

核融合プラズマ領域内 Center for TB Physics の研究活動の一環として、中国西南物理研究所（SWIP）のYihang Chen博士に HL2A（SWIPの中型トカマク装置）で観測された“staircase（階段状構造）”として参照されるセミマクロスケール（ジャイロ半径とプラズマの小半径の間の中間領域）の構造形成についてセミナーを行っていただきました。

Joint discussion meeting between SWIP and Kyoto U.

Speaker: Dr. Yihang Chen (SWIP)

Title : Staircase measurements and associated transport study in magnetically confined toroidal plasmas

Time : July 18 (Thursday) 16:00 – (JST) and 15:00 – (CST)

Contact person: W. Wang (SWIP) and Y. Kishimoto (Kyoto U.)

同博士はSWIPのHL2Aや2023年より運転を開始したHL3において、計測・実験研究とともに、ハードウェアと連結したデータ駆動の制御システムの構築にも積極的に取り組んでおられる研究者です。“staircase”は乱流輸送に支配されるLモードプラズマにおいて現出する構造であり、乱流によって駆動される

準静的な径方向電場とプラズマの圧力がバランスすることで形成される準周期構造ですが、強い乱流に支配されるL-mode状態においても局所的な輸送障壁(TB)が形成される現象としてその実験的同定が世界的にも注目されています。当ユニットメンバーでも、これまで関連研究のシミュレーションの観点から論文報告しています(例えば、Wang et al. Nuclear Fusion 58, 056005 (2018)など)。

本セミナーでは、Chen博士等がHL2Aにおいてコアプラズマの幅広い領域をカバーする24(半径方向)×2(ポロイダル方向)のBESシステムによる高精度の乱流構造とECEシステムによる1cmレベルの電子温度・密度分布の同時計測により、径方向に周期が4cm程度の複数の準周期的なポロイダル流のせん断構造を同定した研究成果の詳細が報告されました。それに呼応して乱流振幅や乱流渦の傾斜角が変化するなど、精緻な計測が印象的でした。この現象は、Lモード状態においても小規模の輸送障壁が形成されている点が興味深く、これがどのようにマクロな輸送障壁に発展して閉じ込め改善がなされるかなどの研究が今後期待されます。これらの研究は新たに運転を始めたHL3での研究に引き継がれるとのことでした。関連して、エネルギー科学研究所の今寺准教授から、以下のコメントがありました。

“ $E \times B$ staircase is considered to be a weak transport barrier accompanied by staircase-like density temperature profiles, which was confirmed in HL-2A experiments. One interest is how a $E \times B$ staircase responses in the modulation of heat input power. In our full-f flux-driven gyrokinetic simulation, a $E \times B$ staircase is clearly formed with moderate heat input power, in which ion temperature gradient is near marginal to drive ITG instability. On the other hand, a $E \times B$ structure is broken once heat input power is increased enough except the case with optimized magnetic configuration such as reversed magnetic shear one. It is meaningful to check the

response of a $E \times B$ staircase on increased heat input power and the accessibility to ITB.”

今後、本ユニットから共同実験を提案するなどを通して、上記今寺氏のコメントを含め、当該分野で協力研究が進展することが期待されます。なお、本セミナーには日本側から7名(NIFS等からの参加者を含む)、中国側から8名の参加者があり、2時間を上回る活発な議論が行われました。

参考文献

Wenbin Liu, Yihang Chen et al., Evidence of $E \times B$ staircase in HL-2A L-mode tokamak discharges, Physics of plasmas 28, 012512 (2021).

(岸本記)

学外ユニットメンバーの LATE実験への参加

核融合プラズマ領域内Center for Spherical Torus Physicsの研究活動の一環として、自然科学研究機構核融合科学研究所の一般共同研究の枠組みを利用して2025年2月4日、5日と3月11日、12日の2回、合計4日間に渡って、学外ユニットメンバーである量子科学技術研究開発機構(QST)上席研究員の今澤良太氏が先端エネルギー科学実験棟に来訪し、非等方圧力下におけるトカマク平衡ならびにイオンの有限ラーマー半径効果の及ぼす影響等について議論とセミナーを行うとともに、小型球状トカマク装置LATEにおいて電子サイクロトロン加熱・電流駆動のみによる球状トカマクプラズマの無誘導立ち上げ実験に参加しました。今澤氏は計測の専門家であり、これまでLATE装置では十分に行われてこなかったイオン温度、流速計測についても議論、提案をしていただき、今後も電子サイクロトロン加熱による非熱的速度分布形成とそのトーラス平衡・安定性に対する影響についての共同研究を進めていく予定です。

(田中記)

光量子・基礎プラズマ研究領域

本領域においては、「Center for Relativistic Plasma Physics」を中心に、前年度に続いて「高強度レーザーと物質との相互作用」に関する多様な研究を展開し、理論・シミュレーション研究および実験研究を行いました。特に、レーザー実験においては本学宇治キャンパスの化学研究所の「化学関連分野の深化・連携を基軸とする先端・学際研究拠点」の枠組みを通して、同研究所先端ビームナノ科学センター（レーザー科学）の高強度レーザー施設（時田研究室）のT⁶レーザーを用いた研究を展開しています。また、そこで使用する微細構造を有するターゲットにおいては同宇治キャンパスのエネルギー理工学研究所の「ゼロエミッションエネルギー研究拠点」の枠組みを通して、同研究所の分子ナノ工学研究分野（坂口研究室）およびナノ光科学分野（松田研究室）と連携しつつ、本学吉田キャンパスのナノテクノロジーハブ拠点の先端装置を用いて作製しています。また、本領域は、非線形・非平衡プラズマ数理研究領域と密接に連携して研究を進めしており、本年度の成果の一部は当該領域に記載しています。

「17th edition of the Kudowa Summer School “Towards Fusion Energy”」 参加報告

2024年（令和6年）6月2日～6月7日の期間、松井隆太郎助教（京都大学エネルギー科学研究所）がチェコ共和国との国境にほど近いポーランドのリゾート地Kudowa Zdrójにて実施されたサマースクール（主催：Institute of Plasma Physics and Laser Microfusion, IPPLM）に講師として招聘され、欧州の各地から参集した修士課程・博士課程の学生約20名を対象として、「Methodology of controlling HED plasma by the interaction between a high-intensity laser and structured targets」のタイトルで40分間の講義を実施しました（参加者総数56名）。講義では、高強度レーザーと物質との相互作用に関する基本事項の解説と、イオン加速実験・シミュレーションに関する国内外の動向を紹介するとともに、現在取り組んでいるイオン加速シミュレーションに関する最新の話題を提供しました。



高強度レーザー生成相対論プラズマについての講義を行う松井助教

本サマースクールは、IPPLMに所属する共同研究者（Lukasz Syrocki博士・2022年7月3日～9月28日の期間、松井助教が受入）に招聘されたものであり、IPPLMは1976年に設立された、ポーランドにおけるプラズマ物理研究の中核を担う研究機関で、レーザープラズマ研究部門（DLP）と磁化プラズマ研究部門（DMP）の2つの研究部門から構成されています。DLP部門では、慣性方式の核融合（ICF）に関する研究、医療応用などを

目指したフェムト秒高強度レーザーと物質との相互作用に関する研究が展開されており、米国ローレンス・リバモア国立研究所の国立点火施設NIF (National Ignition Facility)、世界最高クラスの集光強度領域 (10^{23} W/cm²) を実現している欧州ELI (Extreme Light Infrastructure) -Beamlinesに所属する研究者との活発な交流・繋がりがあることから、本サマースクールにはこれらの研究機関の研究者が複数名参加していました。DMP部門では、欧州原子力共同体EAEC (European Atomic Energy Community) プログラムのもとで、欧州トーラス共同研究施設JET (Joint European Torus) やステラレータデバイスなどの研究施設と連携して、磁場閉じ込め方式 (MCF) トロイダル熱核融合に関する研究を推進しています。

5日間のサマースクールでは、活発な質疑応答を含むセミナー形式の講義に加え、エクスカーションや散策、学生と研究者が寝食を共にした共同生活を送ったことで、NIFやELIの研究者に自身の研究内容を広く周知する大変良い機会となりました。

特に、ELI-Beamlineの実験受入責任者とコミュニケーションをとる機会に恵まれたことで、京都大学の理論・シミュレーション研究内容（レーザーによる非線形波動の励起・遷移とプラズマの爆發現象：「非線形・非平衡プラズマ数理研究領域」を参照）を実証するためのELI-Beamlinesでのレーザー実験を提案されるに至りました。本サマースクールで構築した共同研究のネットワークにより、ELI-Beamlineでの実験可能性、今後のIPPLMの研究者との連携・協力体制へと繋げたいと考えています。

(松井記)



サマースクール会場での集合写真。唯一の日本人参加者として歓迎いただきました。前列中央が松井助教。チェコとの国境は遊歩道に小さな国旗が立つのみでした。

非線形・非平衡プラズマ数理研究領域

本プラズマユニットで進めている核融合プラズマ研究や光量子プラズマ研究は近年大きな発展を遂げ、従来の局所的な線形概念や熱平衡概念の枠組みを超えて、高エネルギー密度状態のプラズマに内在する非線形性や非平衡性を積極的に制御することによってプラズマの新しい機能を開拓する取り組みが多くなされています。磁場核融合プラズマであるITERの標準運転であるHモードやレーザープラズマを用いた高エネルギー粒子加速などもこれらの特性を利用した成功例と言えます。また近年、早期の核融合エネルギーの実現を目指したベンチャーが多く立ち上がっていますが、それらの多くは、安全性や経済性などの観点から魅力的であるものの、当時の概念や技術では困難であると思われた果敢なアプローチを採用しているところが多くあります。これらの状況は、この間、理論やシミュレーションの知見を含めた新しい“概念”や当時では困難であった“技術”にイノベーションがもたらされたことによります。表題の研究領域は、前述の二領域（核融合プラズマと光量子プラズマ）の一般性・普遍性を問いかける領域として位置づけ、プラズマに限らない生物・生命現象や様々な環境で創出されるパターン形成や凝集・爆發現象にもスコープを広げています^{1,2)}。

本年度は、これまでのユニットセミナーに加えて、本研究領域の新しい試みとして、宇宙・天体研究分野や原子・分子過程・医療応用分野の研究者に参加いただき、熱緩和状態から離れた非熱プラズマの特性や制御、それらを用いた応用研究の可能性や展望について専門分野を超えて議論する研究会を京都大学東京オフィスで実施しました（以下で報告）。

また、本領域が扱う素過程の一つである前述のパターン形成や凝集・爆發現象において、興味深い研究が報告されたので、それに関する報告を掲載します。

参考文献

- 1) 2022年度非線形・非平衡プラズマ科学研究ユニット報告書
- 2) 浅井朋彦他：「企業による核融合研究の最近の動向」、プラズマ・核融合学会誌93,16-45 (2017)

「非局所・非平衡概念に基づくプラズマの背景物理と制御法の開拓」に関する研究会

制御熱核融合として参照される核融合は、例えばITERなどの水素・重水素(DT)反応では、実際に反応を起こす50keV程度の少數のイオンを支えるため、10-20keVの熱化したバルク状態のプラズマを生成・保持することで実現します。このアプローチでは、より安全性に優れていると言われる重水素・ヘリウム3核融合(D^3He)や水素・ホウ素核融合($p^{11}B$)など、より断面積が小さい燃料を用いた核融合を起こすには困難であることから何らかの方法で（バルクの重みを最小限にした）非熱的なアプローチが望まれます。そのような特殊な状態を実現するには、外部からの高エネルギー粒子ビーム／電磁波動の入射やプラズマ内部での自発的に励起・生成

される多様なプラズマ波動を利用して非熱状態を生成・維持する方法論を開拓することが求められることから、この視点に基づいた方法論をプラズマに限らない多様な分野の知見を取り入れる必要があります。当日はオンライン参加を含めて核融合・光量子物理、宇宙・天体物理、レーザー・ビーム物理、原子・分子物理、生体・医療科学など12名の多様な分野の研究者に参加いただき、以下のプログラムのもと、講演途中も随時質問を受け付けながら行うdiscussion meetingとして行いました。

►膠着円盤や惑星形成を含む幅広い宇宙天体分野の一線で活躍される鈴木建教授（東京大学）に太陽におけるコロナ加熱に関する話題を「MHD Waves & Turbulence in the heating & acceleration of solar/astrophysical

研究会プログラム

- ・はじめに（京都大学 岸本泰明）
- ・太陽／宇宙・天体プラズマの加熱と加速におけるMHD波動と乱流（東京大学 鈴木建）
- ・FRCプラズマ形成のプラズモイド合体・乱流ダイナミックス（日本大学 浅井明彦）
- ・磁化プラズマ中での高速粒子による波動励起と加熱・加速とその役割（核融合科学研究所 横田美栄子）
- ・高強度レーザー照射下の非平衡プラズマダイナミクスと背景物理（大阪大学 岩田夏弥）
- ・重イオンビームが作るプラズマとその応用（QST関西光量子科学研究所 森林健悟）
- ・まとめ

同日午前中の本領域研究会

- ・パワーレーザーで駆動された無衝突プラズマ実験（大阪大学 坂和洋一）
- ・非局所・非熱核融合について（東京大学 井通暁）

plasma（太陽／宇宙・天体プラズマの加熱と加速におけるMHD波動と乱流）」のタイトルで提供いただきました。皆既日食時に見られる高度数万kmにおよぶ“太陽コロナ”は、太陽表面である光球や彩層が数千度から一萬度であるのに対して、百万度以上の温度であることが知られています。その加熱源は太陽本体の核融合エネルギーであることは言うまでもありませんが、熱的な概念では低温度の光球や彩層が遠く離れた上空のプラズマを100倍以上の温度に（非局所的）加熱とともに一定の空間に定常的に保持している（閉じ込めている）様相は、一億度のプラズマを外部からの高エネルギー粒子ビームや電磁波動で加熱する核融合システムと高い類似性があり、鈴木教授のお話は前述の非熱システムの理解と実現に深い関連性があることを予見させるものでした。鈴木教授によると、「太陽コロナの加熱や太陽風の生成・加速に費やされるエネルギーは核融合全体が生むエネルギーの100万分の1以下でありエネジエティクスの観点からは核融合エネルギーの“お零れ”……、しかし、それに伴う圧力が宇宙に放出する太陽のプラズマ質量放出を司り、地球周辺を含む太陽系のプラズマの密度分布全体の構造やダイナミックスを定めている…」といった説明から、非熱プラズマ生成の起源や原理とともに、エネルギーの“量”的観点だけからでは語れない素過程の重要性を強く印象付けました。

▶続いて、浅井明彦教授（日本大学）からは「FRCプラズマ形成のプラズモイド合体・乱流ダイナミックス」のタイトルで、前述の先進燃料を使った核融合実現の鍵を握る高ベータプラズマ生成に向けた取り組みについて講演をいただきました。“プラズモイド”は、鈴木教授も言及された太陽コロナの質量放出として、その生成・加速メカニズムに関心がもたれていますが、それを二方向から生成・加速・合体させることで高温プラズマを実験室で生成する方法論について説明されました。特に、衝突後の乱流状態のプラズマが準定常的なプラズマに遷移する過程は太陽コロナの生成過程とも関連していることから両者の今後の情報交換や連携の重要性を感じさせるものでした。関連して、井通暁教授（東京大学）からは「 $p+^{11}B$ （水素・ホウ素11）核融合概念」のタイトルで講演をいただきました。水素・ホウ素核融合（ $p+^{11}B \rightarrow 3^4He$ ）は生成物に中性子を含まない究極の核融合として地域の要請に沿った分散型の核融合エネルギーとして期待されていますが、断面積がDT核融合に比べて小さいことから熱プラズマ概念に従うと300keVもの高温プラズマが必要となり大きな困難に直面します。井教授は高ベータ値のプラズマを目指した球状トカマクの専門家であり、前述のFRCの合体実験とも関係した二つのトーラスプラズマの合体を通じたプラズマ生成の研究に従事して来られましたが、その観点から $p+^{11}B$ 核融合に求め

られる非熱プラズマ生成の要件や可能性について議論をいただきました。

▶樋田美栄子教授（核融合科学研究所）からは「磁化プラズマ中の高速粒子による波動励起と加熱・加速とその役割」とのタイトルでご講演いただきました。本講演では、ヘリカル系の磁場閉じ込め核融合装置（LHD）を中心とした高エネルギー粒子やそれが励起するプラズマ波動によるプラズマの自己加熱の素過程の詳細とともに、太陽コロナ放出とも深く関係した地球磁気圏における高エネルギー粒子励起の波動過程について説明がありました。前者のプラズマ中に励起される波動過程は高エネルギー粒子損失をもたらす懸念材料として考えられてきましたが、それをバルクプラズマの加熱に転化する方法として“アルファーチャンネル”として参考され注目されています。特に、同教授のグループ（NIFS複合大域シミュレーションユニット）が進めている高エネルギー粒子と熱的イオンとの結合や加熱をミクロな乱流レベルまで取り入れて統合的に扱うマルチスケールのシミュレーション体系について説明いただくとともに、非熱プラズマの理解に当たっては異なったスケールの揺らぎ間の相互作用を高精度で予測できるシミュレーションの重要性が強く認識されました。さらに、地球磁気圏における水素・ヘリウム・酸素イオンなどの磁場を横切る粒子加速を司る高エネルギー粒子駆動の低域混成波についての説明があり、非熱粒子の生成・制御を担う波動の重要性と役割が議論されました。

▶森林健悟博士（量子科学技術研究開発機構）からは「重イオンビームが作るプラズマとその（医療）応用」とのタイトルでご講演いただきました。粒子ビームは、中性粒子ビーム（NBI）を中心に、これまで核融合プラズマ加熱に中心的な役割を果たしてきましたが、この間、水素イオンとともにより高価数の重粒子線癌治療を中心とした医療応用に大きな展開を見せていました。森林博士は、重粒子線の入射が生体細胞に与える影響やそれ

が最終的に癌細胞を死滅に導くエネルギー付与の素過程の解明やモデルの構築に向けた研究に従事し、特に重粒子の生体分子・原子の電離に伴って発生するプラズマが2次電子の動径線量分布に重要な役割を果たすことを指摘するとともに、それをシミュレーションによって第1原理的に評価する研究に従事されました。特に、プラズマ生成に伴い発生するプラズマ振動や（磁場核融合プラズマの中心的課題でもある）プラズマ中に発生する静電場が動径線量分布に大きな影響を与える同博士の研究はプラズマの新しい可能性を予見させるものでした。

▶さらに、坂和洋一准教授（大阪大学）からは「パワーレーザーで駆動された無衝突プラズマ実験」、岩田夏弥教授（大阪大学）からは「高強度レーザー照射下の非平衡プラズマダイナミクスと背景物理」のタイトルで講演をいただきました。これらは、近年急速にしている高強度レーザーやフェムト秒からナノ秒の時定数で生成される極限状態のプラズマに関する研究に関わる話題であり、光量子プラズマ領域の中心課題ですが、今回はそれらの背景にある非線形・非平衡特性を中心に素過程の観点から報告いただきました。これらの報告に関連して、光量子プラズマ領域の松井隆太郎助教（京都大学）より、非局所・非平衡の観点から講演に関するコメントがありましたので、それを掲載します。



研究会の様子

●坂和洋一准教授へのコメントと議論

ほぼ光の速さで地上に降り注ぐ非熱的な高エネルギーの荷電粒子「宇宙線」は、その工

エネルギーにより大きく3つの起源に分類できる。 10^8 eV以下は太陽系内、ベキ乗分布を持つ 10^8 eV以上の宇宙線は、“knee”と呼ばれる $10^{15.5}$ eVの領域でベキ指数が変化し、 $10^{8-15.5}$ eVのknee以下の領域は銀河系内、kneeを超える領域は銀河系外にその起源をもつと言われている。銀河系内で生成される宇宙線の加速機構は、超新星爆発によって生成された無衝突衝撃波による統計加速が最有力候補とされている。高強度レーザー生成プラズマの分野では、衝撃波（加速）というキーワードは頻繁に登場し、非常に活発な研究対象となっている。具体的には、集光強度が 10^{18} W/cm²を上回るような高強度レーザーを物質に照射することで、プラズマ中に「無衝突電衝撃波」が形成される。このとき衝撃波静止系において、衝撃波に付随する「静電ポテンシャル」により上流のイオンが反射される現象が「衝撃波加速」と呼ばれている。一方で、特に数10フェムト秒の極短パルス高強度レーザーを使用した場合に形成される衝撃波は、エネルギー供給がパルス幅程度の短時間で終了するため、外部からの継続的なレーザー加熱による（衝撃波面下流での）熱化領域の形成や、衝撃波面の前後でランキン・ユゴニオの関係式が成立する、いわゆる“定常的な衝撃波”とは異なる定義が必要であると考えられる。

坂和先生のセミナーでは、この「高強度レーザーにより形成される衝撃波と衝撃波加速」に対する新たな定義付けと発生条件について言及された点が大変興味深かった。坂和先生は、衝撃波面と加速粒子との位置関係に着目し、衝撃波の下流（レーザー側）に存在する粒子が単極の衝撃波電場により上流へ加速される現象を「double layer加速」に分類し、衝撃波の上流に存在する粒子が衝撃波電場によって反射・加速される現象が「衝撃波加速」であると明確な定義づけを提唱された。さらに複数イオン種プラズマ中では、上流のイオンが静電的なイオン2流体不安定性により熱化（運動量に広がりを持つ）することによって、衝撃波ポテンシャルで反射される上流イオン数が増加し、衝撃波加速に重要となるこ

とが提示された。これは、これまでの衝撃波加速が衝撃波の「強度（電場強度）」や「速度（マッハ数）」といった観点でのみ議論されてきた点と大きく異なり、大変斬新な視点であると感じた。高強度レーザー生成プラズマを利用した衝撃波加速は、上述のような高エネルギー宇宙線の生成起源の解明（特に、粒子が衝撃波による統計加速を受けるのに必要なエネルギーまで予備加速される機構の解明「注入問題」）に重要な知見をもたらすのみならず、加速粒子の单色性の高さを利用した小型粒子線がん治療装置の開発に貢献し得る重要なテーマである。今回のセミナーで提示された視点により、衝撃波加速に関する研究の新たな展開が期待できる。さらに、銀河系内外において異なる起源（加速機構）と時空間領域で加速された粒子のベキ乗エネルギー分布関数が $10^{15.5}$ eVのknee付近で接続し、連続した1つの曲線となっている点は特筆すべきであり、「実験室宇宙物理」の観点でこの現象の理解が進展することを期待している。

●岩田夏弥教授へのコメントと議論

高強度レーザーと物質の相互作用と、それにより生成されるプラズマのダイナミクスは、レーザーのパルス幅によって分類することができる。フェムト秒レーザーを用いた場合には、レーザー照射（フェムト秒オーダの擊力の付与）によって、プラズマをその目的（医療・産業への応用や学術領域への展開）に沿って極端な高エネルギー状態（数10kTの磁場や数100 TV/mの電場を伴う相対論プラズマの領域）に押し上げることが可能である。一方で、そのような高エネルギー状態はレーザーの集光径（～数マイクロメートル）やパルス幅（数10フェムト秒）で特徴づけられる局所的な時空間領域（ミクロスケール領域）においてのみ存在可能であり、レーザー場に直接応答する“電子のダイナミクス”によって特徴付けられる。岩田先生のご講演では、ピコ秒レーザーを用いることで、生成するプラズマの時空間領域がフェムト秒レーザーを用いた場合と比較して数桁大きくなる「メソスケー

ル領域」であると定義し、フェムト秒レーザーでは達成が困難な、“イオンのダイナミクス”が支配的となる新しいプラズマ物理領域をご紹介いただいた。この領域は、ピコ秒レーザーのパルス時間と集光径で決まる時空間領域に対応する、ピコ秒の時間スケール、かつ、数 $10 \mu\text{m}$ から $100 \mu\text{m}$ オーダーの空間スケールでレーザー加熱（エネルギー付与）を行うことで実現する。具体的には、集光強度が $10^{18-19} \text{ W/cm}^2$ 領域でパルス幅がサブピコ秒のLFEX レーザー（大阪大学レーザー科学研究所）を利用することで、相対論領域のプラズマの生成と、レーザー光圧とプラズマ圧力の平衡状態を通じてレーザー場がイオンのダイナミクスと応答する状況が同時に達成可能となる。メソスケール領域は、ミクロスケール領域と比較して電磁場をはじめとしたプラズマを特

徴付ける物理量の計測が比較的容易であると考えられることから、今後の実験による検証や、相対論プラズマの長時間保持が要求される熱核融合反応をはじめとした様々な応用研究への展開が期待される。

本研究会は、京都大学エネルギー理工学研究所ゼロエミッション研究拠点課題「広帯域エネルギー融合科学の概念に基づく非線形・非平衡プラズマの物性・制御」(ZE2024D-01) および京都大学大学院エネルギー科学研究所国際先端エネルギー科学研究教育センターの支援のもと実施されましたが、幅広い科学的視点と異分野連携・融合のもとにエネルギー研究を開拓する同拠点・センターの趣旨に沿った意義深い研究会となりました。

(岸本記)

非線形波動の瞬間的分岐による爆発現象の発見と新たなプラズマの可能性

非線形・非平衡プラズマ数理領域では、高強度レーザーによって駆動された非線形波動により、高密度プラズマと高強度のレーザー場が安定して共存する新しい非平衡プラズマ状態が創出されることを見だしており、本成果は2025年1月31日付で米国物理学会のオープンアクセス誌である Physical Review Research に掲載されました (R. Matsui and Y. Kishimoto "Transient bifurcation induced

rocket acceleration leading to a relativistic bulk medium induced by designed high-intensity lasers" DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.7.013119>)。

極低温冷却技術を用いて作製可能な固体水素／水素リボンに、ELI-Beamline 等の高強度レーザー（集光強度： 10^{22} W/cm^2 領域）を照射することで、固体水素は瞬時にプラズマ化すると共に、レーザー照射表面近傍の電子がレーザー光圧により前方に押し出されることで、プラズマ中に正の単極電場を伴う衝撃波様構造が励起・伝播します。この衝撃波

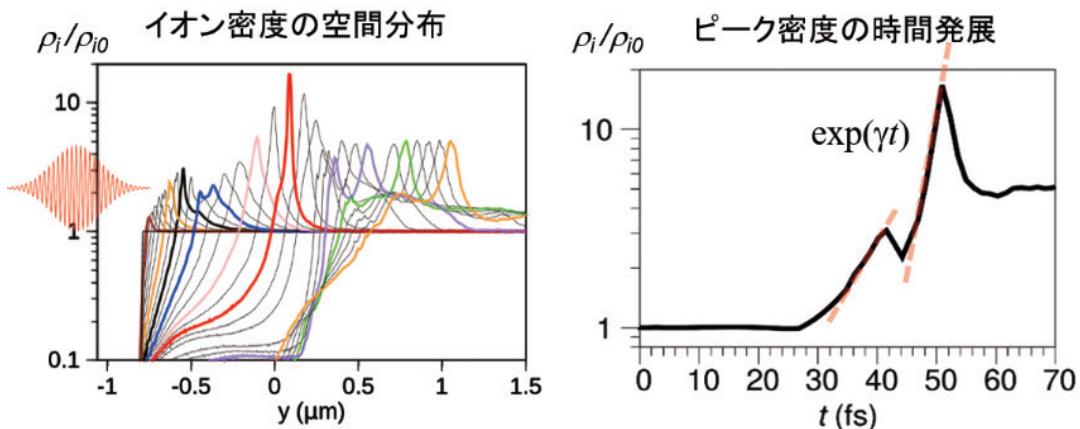


図1：イオン密度の空間分布図の時間変化（左）とピーク密度の時間発展図

は、ランキン・ユゴニオの関係が成立する定常的なものではなく、単極電場の強度も高エネルギー電子の圧力とレーザー光圧との大小関係に対応してダイナミックに変化します。この過程でイオンの衝撃波様構造のピーク密度は指数関数的に増大し、初期の固体密度の20倍に達します（図1参照）。

この瞬間、衝撃波様構造のサイズが局所的なデバイ長を大きく下回ることで、強度が200 TV/mに達する正負の両極電場が形成され、衝撃波様構造はソリトン様構造に瞬間に遷移します。その結果、図2に示すように、固体水素の約20倍にまで圧縮された高密度物質が“爆発”を引き起こします。この爆発により、ソリトン様構造は互いに反対方向に運動する2つの衝撃波様構造に再び遷移し、一方の衝撃波が「燃料」として後方に噴出し、これにより推進力を得ることで、もう一方の衝撃波は「ロケット」として前方に大きく加速されるとともに、上流のプラズマをバルク状態で押し出します。これにより、最終的にサブGeV領域の陽子線が高フラックスで生成可能であることを理論・シミュレーションにより予測しました。

本ロケット推進機構は、衝撃波／ソリトン様構造といった非線形波動の瞬間的な遷移により引き起こされますが、この間、高密度プラズマと高強度のレーザー場が安定して共存する“frozen-in状態”が成立しています。これにより、非平衡・高密度プラズマが飛散することなく、高強度レーザー場が共存しながら伝播する新たな極限状態が実現可能となります。また、本機構は、宇宙において最も多く存在する元素である「水素」を使用することで実現している点も興味深いと言えます。今後、水素よりも重い媒質で本機構が機能する媒質（ターゲット）を探索することで、バルクプラズマを用いた応用研究の枠組みが広がることが期待されます。

（松井記）

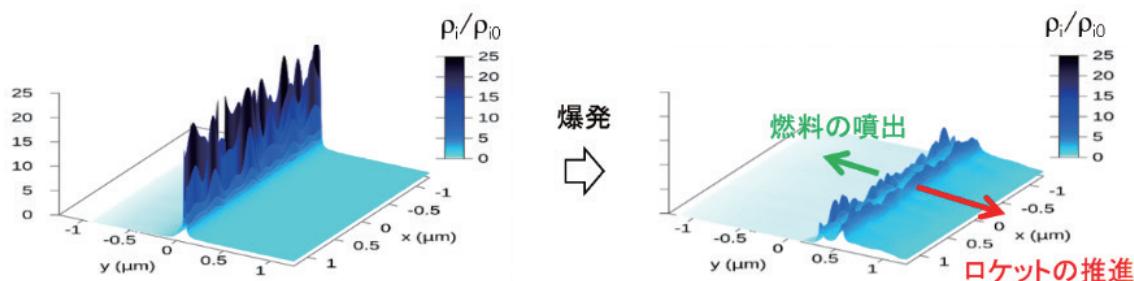


図2：高強度レーザー照射された固体水素中で現出する爆発現象（相対論的ロケット加速）

国際学会

「8th conference on Association of Asia Pacific Physical Societies-Division of Plasma Physics (AAPPS-DPP2024)」 (November 3-8, Malacca, Malaysia) 参加報告

2024年（令和6年）11月3日～11月8日の期間、岸本泰明名誉教授（京都大学）と松井隆太郎助教（京都大学エネルギー科学研究所）がマレーシアの都市マラッカで開催された国際学会「AAPPS-DPP2024」に参加しました。本学会は、アジア太平洋物理学会連合のプラズマ物理分科会が主催するもので、2024年度は中国・日本・インドをはじめとするアジア諸国に米国などを含めた34か国から472名の参加者があり、発表件数は529件と盛況でした。

岸本名誉教授は「Characteristics of global dispersion modeled for JT-60U strongly reversed magnetic shear plasmas exhibiting L-mode with strong profile constraints」のタイトル（筆頭著者：本学エネ科大学院生Rui Zhao氏）でポスター発表を行い、JT-60Uトカマクにおけるドリフト波不安定性と乱流輸送に関する線形・非線形シミュレーションの結果を報告し、2つの異なった半径領域に出現する自由エネルギー源が粒子および熱流束の内側と外側の両方の伝播を引き起こすことを明らかにしました。松井助教は「A new acceleration scheme to obtain high-purity sub-GeV protons by utilizing an explosion dynamics of laser-irradiated solid/liquid hydrogen medium」のタイトルで口頭発表（招待講演）を行い、集光強度が 10^{22} W/cm²に及ぶフェムト秒高強度レーザーを固体水素に照射することで、バルク状態のプロトンをサブGeV領域にまで加速させる相対論的ロケット加速のメカニズムについて報告しました。

松井助教が講演を行ったセッションでは、医療応用を目的とした粒子線源の開発を目指した最新の研究内容に関する発表が多い印象でした。本分野では、

長年100 MeV未満で停滞していたイオンの最大エネルギー記録に対し、2024年4月に150 MeVを記録した実験結果がNature Physics誌において発表されるなど、レーザープラズマの分野で注目を集めているトピックスの一つです。また、高次高調波発生に関するトピックスも多い印象で、当該分野における情勢やトレンドを実感することができました。



U30award授賞式において、表彰を担当された岸本泰明名誉教授。

岸本泰明名誉教授は、プラズマ物理学分野で顕著で独創的な研究を行った、優れた30歳未満の科学者/学生に送られる Young Scientist and Student Award (U30) における表彰をご担当され、6名の若手研究者が授賞されました。

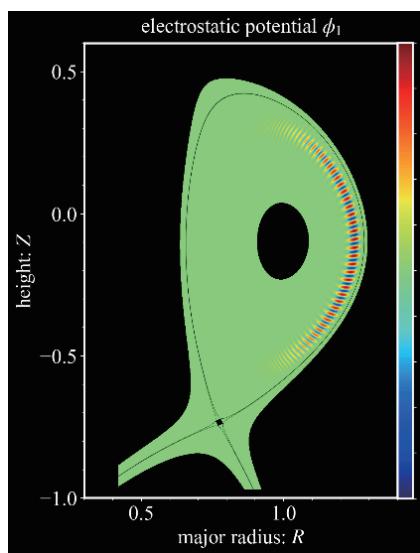
（松井記）



六ヶ所フュージョンエネルギー研究所への実習生派遣について

本プラズマユニットは、量子科学技術研究開発機構との包括連携協定のもと、六ヶ所フュージョンエネルギー研究所と「核燃焼プラズマの閉じ込め研究」に関する共同研究契約を締結しています。これに基づいた実習生の受け入れ提案を昨年度に引き続いて頂き、2024年11月28日（水）～12月6日（金）の10日間、エネルギー科学研究所 石澤研究室の奥田修平君（博士2回）を六ヶ所フュージョンエネルギー研究所に派遣しました。

周辺領域の乱流運動を理解することは、燃料供給/不純物排気、ダイバータ熱負荷などを予測し制御する上で重要です。ジャイロ運動論シミュレーションは第一原理に基づいてこれらの物理を研究するための本質的な手段ですが、内側コア領域には複雑な磁気面形状を持つ周辺領域に適用することは容易ではありません。そこで奥田君は、大域的ジャイロ運動論コードGKNETにシフトメトリック法を用いた沿磁力線座標系を導入した後、トカマク実平衡を扱うためのインターフェイスコードと接続し、周辺領域とコア領域を合わせて計算する新たなジャイロ運動論コードGKNET-Xの開発を進めています（下図）。



図：GKNET-Xで得られたイオン温度勾配(ITG) 不安定性のモード構造。

今回の滞在では、その開発を行うために重要な周辺プラズマ物理の理解を主たる目的に据えて、六ヶ所フュージョンエネルギー研究所の瀬戸春樹氏、河村学思氏、Si Hang氏と議論を行いました。特に、周辺コードBOUT++やSOL/ダイバータコードSOLPSで用いている物理モデルや計算条件を学び、今後GKNET-Xを拡張する上での理論基盤の構築を行いました。

小職も同行した最初の二日は天気が良く、京都とあまり変わらない気候でしたが、その週末からは雪が降り、一面銀世界になったそうです（下写真）。



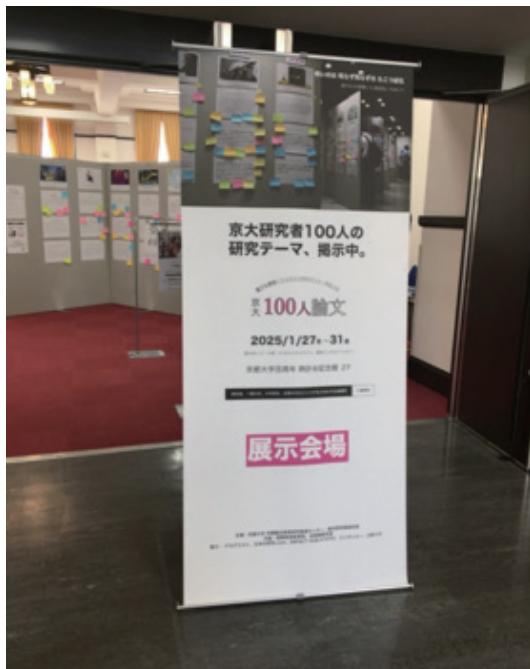
六ヶ所フュージョンエネルギー研究所近くの雪景色

受け入れ頂いた六ヶ所フュージョンエネルギー研究所の皆様、この度は誠にありがとうございました。

（今寺記）

「京大100人論文」参加報告

ユニット活動のビジビリティ向上のため、2025年1月27日（月）から1月31日（金）まで京都大学百周年時計台記念館2F国際交流ホールIにて開催された京都大学学際融合教育研究推進センター主催の「京大100人論文」に初めて参加しました。これは、京都大学の様々な分野から研究者100名がそれぞれ研究ポスターを掲示し（ポスターの印刷掲示は事務局が行う）、分野も組織も世代も超えて対話する「匿名制」の研究ポスター発表大会です（<https://www.c pier.info/100nin-2024>）。口頭発表はなく、「1つの写真」と「3つの設問」を掲示しあい、匿名でコメントし合うスタイルをとることにより、専門や職位、所属組織名だけで内容を判断してしまいがちな先入観を取り除き、「問い合わせ（研究テーマ）」そのものに焦点をあてて本音で問い合わせ、というものです。本ユニットからは小型球状トカマク装置 LATE の写真と「「プラズマ」を操りたい、実験室で小さな太陽を作れるくらいに！」をタイトルとして（タイトルは提出した3つの設問に対する回答から事務局が作成）ポスターを掲示し、付箋に書き込まれた多くのコメントをいただきました。ほとんどは非専門分野の方からのもので、面白そうだとか期待していますといった感想が書かれて



いました。プラズマという言葉は耳にしたことがあるけれども詳しくは知らないというのが実情で、より広い一般への広報活動の必要性を感じました。この常設のポスターと並行して、午前には「問い合わせ交差点」という初対面同士の研究者が自己紹介をしあって分野も世代もすべて超えて理解を深めようというプログラムが開かれ、午後には研究テーマ掲示者を招待して気軽にディスカッションする Special Session や一つのキーワードをもとに徹底議論する Keyword Session が開かれました。本ユニットには「教育」をキーワードとした Keyword Session に参加依頼があり、ファシリテーターのガイドのもとで近代西洋哲学、アジア文化、法学、教育学をそれぞれ専門とする研究者と自由な議論をさせていただきました。一般教育から京大での教育、さらには各専門分野での若手育成に関する話にまで話題は広がりましたが、教育の原点は知りたいという動機付けにあるという点を再認識させられました。今回の参加では専門分野が異なり、考え方や価値観も異なる研究者との交流により新たな気づきを得ることができ、貴重な体験となりました。

（田中記）



プラズマ科学セミナー

研究者間の積極的な交流・情報交換を通して異分野の知見を集約・吸収するとともに、各領域の重要課題の解決を図り、広帯域エネルギー融合科学の進展を目的として実施しています。関連分野の国内外の専門家が集い最新の研究成果や情報を報告・議論する場を設けることを趣旨とし、本年度は計3回のセミナーを実施し、最新の研究成果についての情報共有と意見交換を行い、計59名が議論に参加しました。

本研究集会は、講演者の研究分野の役割・意義・動機を中心にフランクに議論するとともに、講演者自身も多様な分野の参加者との意見交換を通して多様な知見を得ることを目的とした discussion seminar として運営を行っています。

第34回 2024年6月10日

Development of diagnostics and plans for burning plasma experiments on HL-3 tokamak

Prof. Deliang Yu
(Southwestern Institute of Physics)



HL-3 is a newly constructed tokamak in SWIP and the first plasma was obtained in the year 2020. Focused on the performance of HL-3, around 40 sets of diagnostic systems were developed. This presentation addresses the progress of diagnostic systems and the preparation for the deuterium-tritium experiments. The report consists of four parts, the development of diagnostics on HL-3, overview of deuterium-tritium diagnostics, design progress of the deuterium-tritium diagnostic systems as well as the challenges and related issues. The first part introduces the status of diagnostics measuring the plasma densities, temperatures and plasma radiations, etc. The second part depicts the status and the requirements of the diagnostics for the deuterium-tritium plasma; the third part describes the progress of the diagnostics for the deuterium-tritium, and the last part displays the challenge issues for the diagnostics of the burning plasma.

HL-3 Tokamak



HL-3 tokamak (known as HL-2M previously) constructed in Chengdu, 2020 focus on critical physics and technology challenges for ITER and next-step fusion devices

- High performance, high β_N scenarios compatible with advanced divertor
- Tests and validation of high heat flux plasma-facing components
- Investigation of advanced plasma physics with high performance



HL-3 Main Parameters

Major radius	$R = 1.78 \text{ m}$
Minor radius	$a = 0.65 \text{ m}$
Aspect ratio	$R/a = 2.8$
Plasma current	$I_p = 2.5 (3) \text{ MA}$
Toroidal field	$B_t = 2.2 (3) \text{ T}$
Elongation	$\epsilon = 1.8-2$
Triangularity	$\delta > 0.5$
Heating power	NBI (20)+ECRH (14)+LHCD (4)+ICRH (6)

第35回 2024年11月22日

高強度レーザーが駆動するプラズマ中の輸送現象における非熱的粒子の役割

Transport phenomena in laser plasmas and the role of nonthermal particles

岩田 夏弥 教授

(大阪大学レーザー科学研究所)

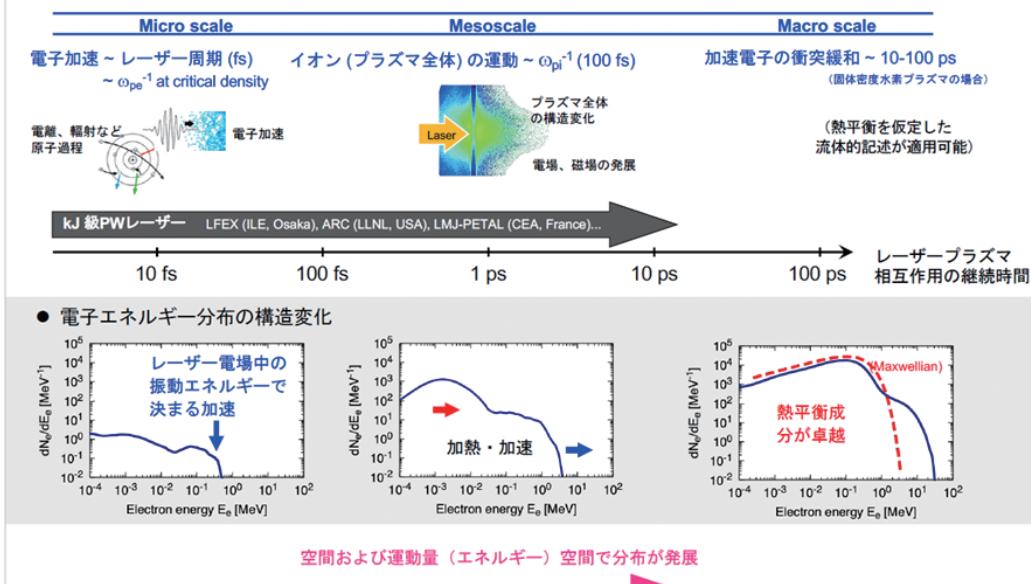


高強度レーザーの発展[1]により、GeVエネルギーの電子加速から、PPa (10 Gbar) を越えるエネルギー密度の核融合プラズマ生成まで幅広い応用が拓かれている。高強度レーザー光が生成する非熱平衡プラズマでは、ミクロな非熱的粒子の運動、マクロなプラズマ流動、そして温度や電離度が連動してエネルギーが輸送されていく。その物理の理解が様々な現象の解明に重要である[2]。本セミナーでは、レーザープラズマ相互作用における時空間スケールについて整理したのち、特に、レーザー加速される非熱的電子の振る舞いと、それらの電子に駆動され進展するプラズマ流動（イオン加速, Ref. [3]）や加熱についての研究を紹介する。また、最近では、米国NIFレーザーによる核融合燃焼プラズマ生成[4]を受けて、プラズマ燃焼物理の新しい領域が開かれようとしている。このような高エネルギー密度燃焼プラズマにおいても、非平衡[5]・非局所といった位相空間特性が重要な可能性があり、最近の理論・シミュレーション研究における取り組みとその展望についても議論したい。

参考書・参考文献

- [1] C. N. Danson *et al.*, High Power Laser Sci. Eng. 7, e54 (2019)
- [2] N. Iwata and A. Sunahara, プラズマ・核融合学会誌, Vol. 99, No. 5, 177 (2023)
- [3] N. Iwata *et al.*, Phys. Rev. Research 3, 023193 (2021); N. Iwata *et al.*, HEDP 51, 101107 (2024)
- [4] H. Abu-Shwareb *et al.*, Phys. Rev. Lett. 132, 065102 (2024)
- [5] E. P. Hartouni *et al.*, Nat. Phys. 19, 72 (2023)

レーザー駆動高エネルギー密度プラズマ形成・発展の時間スケール



Natsumi IWATA (IIE, Osaka Univ.)

プラズマ科学ユニットセミナー

Nov. 22, 2024

第36回 2024年12月20日

磁化プラズマ中の無衝突衝撃波によるイオンの加速

Ion acceleration by a collisionless shock wave in a magnetized plasma

樋田 美栄子 教授

(核融合科学研究所)

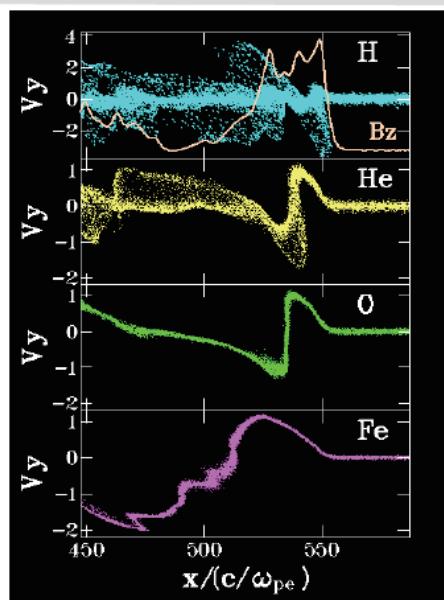


荷電粒子間の衝突がほとんど効かないプラズマ中の無衝突衝撃波は、プラズマ物理の重要な研究課題の一つであり、長年にわたり多くの研究が行われている。特に、電子とイオンの各粒子の運動と電磁場の変動を自己無撞着に計算する粒子シミュレーションが、無衝突衝撃波の研究において大きな役割を担ってきた。また、宇宙・天文分野では、無衝突衝撃波は宇宙線加速などの高エネルギー現象に深く関わるものとして注目されている。無衝突衝撃波はプラズマの集団現象によって形成される電磁場と各粒子の相互作用によって形成される。その相互作用は多様で複雑であり、無衝突衝撃波は磁場の有無、衝撃波の伝播速度、伝播角などによって異なる様相を示す。本講演では、磁場が存在し、衝撃波の伝播方向が磁場に対して直角から斜めの場合に顕著に現れる、速い磁気音波の衝撃波に注目する。アルヴェンマッハ数が10より小さいような磁気音波の無衝突衝撃波について、電磁場の構造と粒子の運動を解説する。理論と粒子シミュレーションの結果を基に、プラズマベータ値が小さく比較的強い磁場中では、衝撃波面によるイオンの反射、複数種イオンプラズマでの重イオン加速など、衝撃波面付近の強い電磁場による急激な粒子加速が起こり得ることを紹介する。

参考書・参考文献

- [1] 大澤幸治, 講座「衝撃波による粒子加速」プラズマ・核融合学会誌 Vol.84 (2008) No.9 p. 583, No. 10 p. 705, No.11 p. 822.

複数種の重イオンを含む場合のシミュレーション



主成分 H

少数粒子が加速

← 縦電場 E_x

副成分 He, O, Fe

全ての重イオン

(全種類、全粒子)

ほぼ同じ速度に加速

← 横電場 E_y

(詳し見ると、縦電場の影響が小さいほど、重イオンの加速は強くなっている。)

Toida & Ohsawa, Sol. Phys. 171 (1997) 161.

Toida, Higashino, & Ohsawa, Phys. Plasmas 15, (2008) 092305

プラズマ科学セミナー一覧

日程	講演者	タイトル
第1回 2020/8/26	森林 健悟 上席研究員 (QST量子生命科学領域)	重粒子がん治療におけるプラズマ物理の役割 Role of Plasma Physics in Heavy Particle Cancer Therapy
第2回 2020/10/19	仲田 資季 准教授 (核融合科学研究所)	乱れと流れをアクティベートする新しい磁場閉じ込めプラズマの開拓 Voyage to innovative plasma confinement activating turbulence and zonal flows
第3回 2020/11/27	秀道広 教授・副学長 (広島大学)	反応閾値と数理的拡散モデルから解く慢性蕁麻疹の病態と治療 Approach to the pathogenesis and treatment of chronic spontaneous urticaria by mathematical diffusion and threshold model of histamine
第4回 2021/3/1	佐藤 雅彦 助教 (核融合科学研究所)	LHD プラズマにおける圧力駆動型MHD 不安定性に対する運動論的MHD シミュレーション研究 Kinetic MHD simulation study of pressure driven MHD instabilities in LHD plasmas
第5回 2021/3/16	田口 俊弘 客員研究員 (日本原子力研究開発機構)	ワイベル不安定性が支配するプラズマ諸現象と理論的背景-宇宙からレーザー核融合まで- Various Plasma Phenomena governed by the Weibel Instability and Its Theoretical Background-From Space Physics To Laser Fusion Research-
第6回 2021/3/17	中嶋 隆 准教授 (エネルギー理工学研究所)	新しい切り口で見たレーザー-溶液中ナノ粒子の相互作用と展望- New perspectives on the laser-nanoparticle interactions and outlook-
第7回 2021/3/30	浅井 朋彦 教授 (日本大学)	超高ベータプラズモイド：FRC（反転磁場配位）の未解明な謎 Unexplained Mysteries of Extremely High Beta Plasmoid:FRC
第8回 2021/6/11	桐山 博光 グループリーダー (QST関西光科学研究所)	超高強度レーザーの進展 Ultra-high Intense Lasers Today and Tomorrow
第9回 2021/6/15	深見 一弘 准教授 (京都大学大学院工学研究科)	非線形ダイナミクスに基づく自己組織化ナノ材料加工 Self-organized materials processing at the nanoscale based on nonlinear dynamics
第10回 2021/6/25	橋田 昌樹 特定准教授 (京都大学化学研究所)	レーザーによる微細構造形成とオペランド計測技術 Formation of laser induced periodic surface structure and its operando measurement
第11回 2021/7/16	比村 治彦 教授 (京都工芸繊維大学)	2流体プラズマの開拓—非中性プラズマからのアプローチ— What's two-fluid plasma? -exploring with non-neutral plasmas-
第12回 2021/7/20	田中 謙治 教授 (核融合科学研究所)	乱流駆動輸送の磁場配位効果 Effects of magnetic configuration on turbulence driven transport
第13回 2021/8/10	James Koga 専門業務員 (QST関西光科学研究所)	Role of plasma behind high intensity laser-matter interaction and future prospect

日程	講演者	タイトル
第14回 2021/8/26	田中 謙治 教授 (核融合科学研究所)	乱流駆動輸送の磁場配位効果（2） Effects of magnetic configuration on turbulence driven transport
第15回 2021/10/1	小林 進二 准教授 (京都大学エネルギー理工学研究所)	ヘリオトロン型磁場配位を利用した統計加速の実験室シミュレーションの検討 Investigation of experimental simulation for stochastic acceleration using Heliotron-type magnetically confined configuration
第16回 2021/10/19	三間 圭興 招聘教授 (大阪大学レーザー科学研究所) 藤岡 慎介 教授・副所長 (大阪大学レーザー科学研究所)	高エネルギー密度プラズマ科学の最近の動向から Recent progresses in high energy density science レーザー核融合の爆縮の基本原理と進展 Recent topics and progress of high-energy-density-plasma science
第17回 2021/10/29	棚橋 美治 教授 (中部大学)	宇宙への打上げ技術の現状と課題 Current status and issues of launch technology to space
第18回 2021/12/21	木下 正弘 名誉教授 (京都大学)	非線形科学を通したプラズマ物理と他分野（生物物理・電気化学・医学・物質科学など）の分野間の垣根を超えた融合
第19回 2022/1/21	本多 充 教授 (京都大学工学研究科附属工学基盤教育研究センター)	トカマクプラズマの輸送研究と統合コード開発、そして機械学習の応用 Transport physics studies and the development of integrated models in tokamak plasmas, and the application of machine learning techniques to these issues
第20回 2022/1/25	松清 修一 准教授 (九州大学)	相対論的磁気流体波のパラメトリック不安定性と粒子加速 Particle acceleration in parametric instabilities of relativistic MHD waves
第21回 2022/2/2	今澤 良太 主幹研究員 (QST 那珂研究所)	STにおけるドップラーフィルタ計測とITERにおけるポロイダル偏光系による電流分布計測
第22回 2022/2/21	山崎 了 教授 (青山学院大学)	天体衝撃波での粒子加速研究と高強度レーザーを用いた実験室宇宙物理学 Studies of collisionless shocks in astrophysical objects and in laboratories
第23回 2022/6/13	佐々木 明 専門業務員 (QST 関西光科学研究所)	次世代半導体リソグラフィの実用化に至るEUV光源のプラズマ分光、原子過程研究の歩み On plasma researches of EUV light source for next generation lithography
第24回 2022/7/5	相羽 信行 上席研究員 (QST 那珂研究所)	核融合炉実現に向けたトカマク周辺プラズマ物理研究の現状と課題 Status and issues of plasma physics research at tokamak edge pedestal for fusion reactor
第25回 2022/7/27	伊藤 篤史 准教授 (核融合科学研究所)	プラズマ-物質相互作用のミクロな視点のシミュレーション The simulation study for plasma-material interaction from microscopic viewpoint
第26回 2022/10/18	坂本 宜照 グループリーダー ¹⁾ (QST 六ヶ所研究所)	核融合原型炉の概念設計の現状と設計パラメータについて Current status of DEMO conceptual design and design parameters

日程	講演者	タイトル
第27回 2022/10/25	栗原 研一 文部科学省技術参与 (前QST量子エネルギー部門長)	核融合発電を目指した研究開発戦略の一つの私的レビュー A Personal Review of Strategic Planning of Research & Development toward Fusion Power
第28回 2023/5/17	Prof. Taik Soo Hahm (Seoul National University)	Study of fast ion effects on zonal flow generation using Hasegawa-Mima equation
第29回 2023/5/24	古川 勝 教授 (鳥取大学)	疑似アニーリングによるハミルトン系の平衡・安定性解析—基礎と応用 Equilibrium and stability analysis of Hamiltonian systems via simulated annealing - basis and applications
第30回 2023/5/31	古川 勝 教授 (鳥取大学)	疑似アニーリングによるハミルトン系の平衡・安定性解析—基礎と応用 Equilibrium and stability analysis of Hamiltonian systems via simulated annealing - basis and applications
第31回 2023/8/8	Prof. Taik Soo Hahm (Seoul National University)	ExB Zonal and Vortex Flows in a Magnetic Island; Role of Symmetry Breaking
第32回 2024/1/16	Yuichi Takase, Senior Technical Advisor (Tokamak Energy Ltd.)	トカマクエナジーにおける核融合開発 Fusion Development at Tokamak Energy
第33回 2024/1/23	花田 和明 教授 (九州大学応用力学研究所)	トーラスプラズマのアスペクト比がもたらすこと What aspect ratio of torus plasma brings
第34回 2024/6/10	Prof. Deliang Yu (Southwestern Institute of Physics)	Development of diagnostics and plans for burning plasma experiments on HL-3 tokamak
第35回 2024/11/22	岩田 夏弥 教授 (大阪大学レーザー科学研究所)	高強度レーザーが駆動するプラズマ中の輸送現象における非熱的粒子の役割 Transport phenomena in laser plasmas and the role of nonthermal particles
第36回 2024/12/20	樋田美栄子 教授 (核融合科学研究所)	磁化プラズマ中の無衝突衝撃波によるイオンの加速 Ion acceleration by a collisionless shock wave in a magnetized plasma

コラム

「ゼロエミッションエネルギー」研究拠点とは？

本ユニットの参加部局の一つである京都大学エネルギー理工学研究所は、「ゼロエミッションエネルギー」研究拠点として文部科学省が進める共同利用・共同研究拠点プログラムに認定され、10年に渡って全国の関連研究者と連携・協力して研究活動を行っています。

「ゼロエミッションエネルギー」とは、エネルギーの在り方や生成・変換・利用の方法を自然の摂理や基本原理まで立ち返って深く探究し、それらを通してエネルギーの負荷や損失、二酸化炭素等の有害物質の生成や排出を最小限に抑えた次世代を担う新しいエネルギーを意味します。皆様も積極的にご参加下さい。

http://www.iae.kyoto-u.ac.jp/zero_emission

ユニットメンバー

田 中 仁	教授、ユニット長	大学院エネルギー科学研究所	エネルギー基礎科学専攻
石 澤 明 宏	教授、副ユニット長	大学院エネルギー科学研究所	エネルギー基礎科学専攻
中 村 祐 司	教授	大学院エネルギー科学研究所	エネルギー基礎科学専攻
今 寺 賢 志	准教授	大学院エネルギー科学研究所	エネルギー基礎科学専攻
打 田 正 樹	准教授	大学院エネルギー科学研究所	エネルギー基礎科学専攻
松 山 顯 之	准教授	大学院エネルギー科学研究所	エネルギー基礎科学専攻
松 井 隆太郎	助教	大学院エネルギー科学研究所	エネルギー基礎科学専攻
村 上 定 義	教授	大学院工学研究科	原子核工学専攻
成 田 絵 美	講師	大学院工学研究科	原子核工学専攻
蓮 尾 昌 裕	教授	大学院工学研究科	機械理工学専攻
四 竜 泰 一	准教授	大学院工学研究科	機械理工学専攻
深 見 一 弘	准教授	大学院工学研究科	材料工学専攻
本 多 充	教授	大学院工学研究科	附属工学基盤教育研究センター
大 垣 英 明	教授	エネルギー理工学研究所	エネルギー生成研究部門
長 崎 百 伸	教授	エネルギー理工学研究所	エネルギー生成研究部門
稻 垣 滋	教授	エネルギー理工学研究所	エネルギー生成研究部門
小 林 進 二	准教授	エネルギー理工学研究所	エネルギー生成研究部門
金 史 良	助教	エネルギー理工学研究所	エネルギー生成研究部門
岩 田 晃 拓	研究員	エネルギー理工学研究所	エネルギー生成研究部門
岸 本 泰 明	特任教授	エネルギー理工学研究所	エネルギー生成研究部門
南 貴 司	協力研究員	エネルギー理工学研究所	エネルギー生成研究部門
松 田 一 成	教授	エネルギー理工学研究所	エネルギー機能変換研究部門
宮 内 雄 平	教授	エネルギー理工学研究所	エネルギー機能変換研究部門
中 嶋 隆	准教授	エネルギー理工学研究所	エネルギー機能変換研究部門
野 平 俊 之	教授	エネルギー理工学研究所	エネルギー利用過程研究部門
坂 口 浩 司	教授	エネルギー理工学研究所	エネルギー利用過程研究部門
片 平 正 人	教授	エネルギー理工学研究所	エネルギー利用過程研究部門
木 下 正 弘	協力研究員	エネルギー理工学研究所	エネルギー利用過程研究部門
時 田 茂 樹	教授	化学研究所	附属先端ビームナノ科学センター
升 野 振 一 郎	研究員	化学研究所	附属先端ビームナノ科学センター
阪 部 周 二	名誉教授	京都大学	
坂 和 洋 一	准教授	大阪大学 レーザー科学研究所	
森 井 孝	教授	京都光華女子大学 健康科学部健康栄養学科	
比 村 治 彦	教授	京都工芸繊維大学 電気電子工学系	
三 瓶 明希夫	准教授	京都工芸繊維大学 電気電子工学系	
橋 田 昌 樹	教授	東海大学 総合科学技術研究所	
浅 井 朋 彦	教授	日本大学 理工学部	
田 中 謙 治	教授	核融合科学研究所 可知化センシングユニット	
桐 山 博 光	グループリーダー	量子科学技術研究開発機構 関西光量子科学研究所	
森 林 健 悟	シニアスタッフ	量子科学技術研究開発機構 関西光量子科学研究所	
吉 田 麻衣子	グループリーダー	量子科学技術研究開発機構 那珂フュージョン科学技術研究所	
今 澤 良 太	上席研究員	量子科学技術研究開発機構 那珂フュージョン科学技術研究所	

非線形・非平衡プラズマ科学研究ユニット事務局

〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄 京都大学宇治キャンパス北4号棟320号室

TEL : 0774-38-4434 HP : <http://plasma-fusion.energy.kyoto-u.ac.jp/UNIT>



非線形・非平衡プラズマ科学研究ユニット

Non-linear/Non-Equilibrium Plasma Science Research UNIT