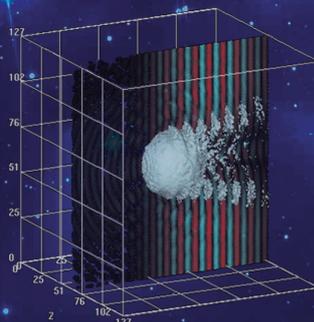
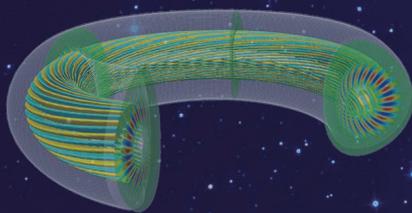


非線形・非平衡 プラズマ科学 研究ユニット

—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 2023



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

CONTENTS

- ごあいさつ
- ユニットについて
- 2023年度ユニット活動
- プラズマ科学セミナー
 - Prof. Taik Soo Hahm (Seoul National University)
 - 古川 勝 教授 (鳥取大学)
 - 高瀬 雄一 Senior Technical Advisor (Tokamak Energy Ltd.)
 - 花田 和明 教授 (九州大学)
- 【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

京都大学学際融合教育研究推進センターのユニット制度のもと、プラズマ科学分野を基軸として非線形・非平衡の観点から物質科学、数理科学などの幅広い分野の研究と連携し、プラズマ科学の新学術の創生と応用を目指そうと活動を始めて4年となりました。今年度も核融合プラズマ、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において、活発な活動を進めるとともにプラズマ科学セミナーの開催を通して、専門を越えたテーマでの議論、交流ができたかと思えます。本報告書にありますようなユニット活動ができますのも、関連部局をはじめ、多くの方々のご支援、ご協力のおかげであります。特に、代表部局のエネルギー科学研究科からは国際先端エネルギー科学研究教育センターを通して先端エネルギー科学実験棟共用スペースの無償利用やユニット事務局活動の支援を受け、円滑なユニット活動が続けられております。この場をお借りして心より御礼申し上げます。

今年度、核融合プラズマ研究領域においては当ユニットが契約主体となった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サイトラボ共同研究が2件進められました。また、QST那珂研究所において超伝導トカマク実験装置JT-60SAが動き出し1MAを超える放電を達成できましたので、これからはさらに活発な共同研究が期待されます。

また、学際融合教育研究推進センターの内規の改定に伴いユニット活動のコンプライアンス強化が進められ、来年度からはユニットによる客員制度、称号付与の廃止が行われることとなりました。制度の変容はありますが、今後とも研究には制約の無い形で自由に活発な活動を展開してゆきたいと思っておりますので、引き続きご支援の程よろしくお願い申し上げます。

ユニット長 田 中 仁

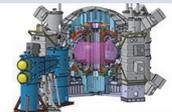
核融合プラズマ研究領域 超伝導トカマクJT-60SA (QST・日欧) の完成(2020)およびITER (国際熱核融合炉) の完成 (2025) と核融合プラズマ実験研究の進展

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)

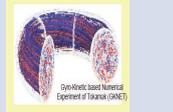


<https://www.qst.go.jp/site/it60/5150.html>

国際熱核融合炉
ITER (2025完成予定)



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)



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

ELI (EU)



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

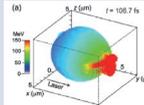
G. Mourou
D. Strickland
CPA 極短パルスレーザー
2018年ノーベル物理学賞



数値光量子プラズマ実験
EPIC (京都大学)



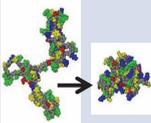
放電過程の自己組織化

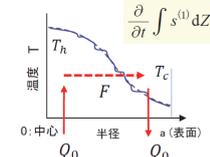


相対論領域のイオン生成

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

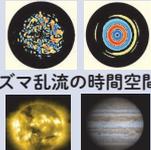
蛋白質の折り畳み (自己組織化)
(謝辞：木下 (京大))



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


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)



非線形・非平衡プラズマ科学研究ユニットについて

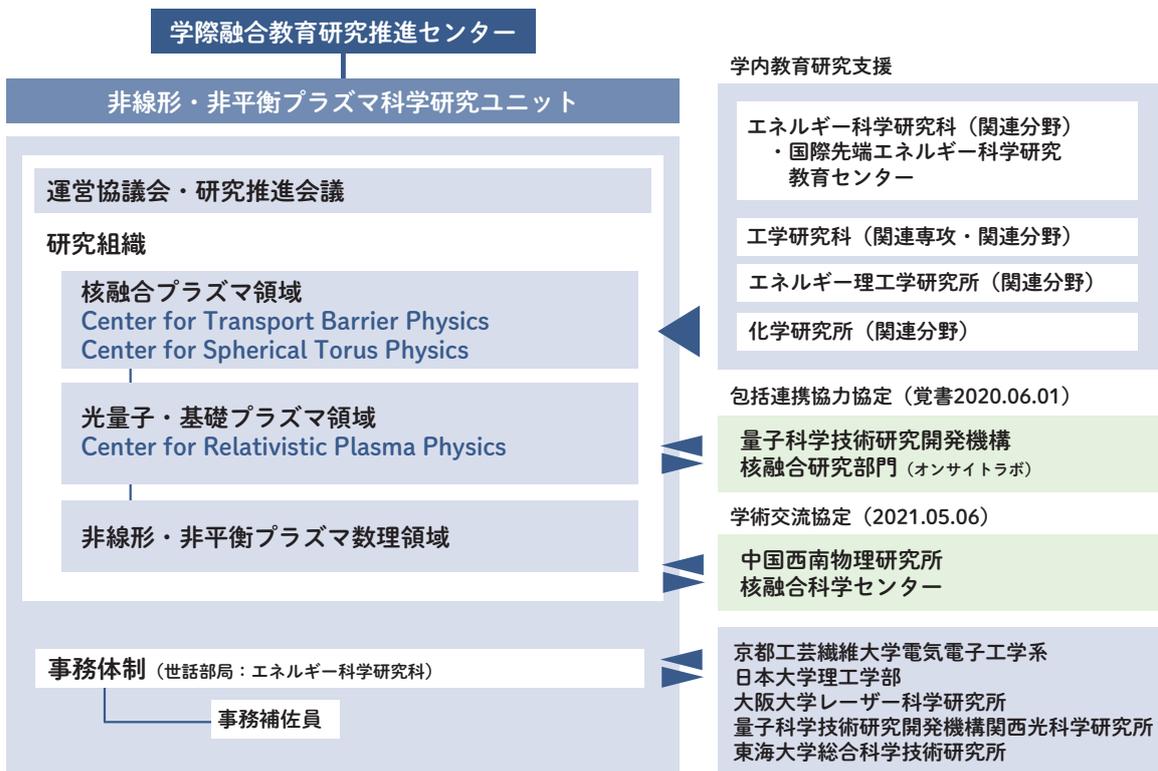
ユニットは、京都大学における多様なプラズマ研究の歴史と実績を背景に、幅広い時空間スケールの非線形性や非平衡性に支配されるプラズマ現象を対象に、同様の過程が重要な役割を果たす物質科学や生命・生物科学、数理科学や情報・計算科学など、異分野の研究者との積極的な連携・協力を通して幅広い知識や知見を共有することにより、複雑性と多様性に満ちたプラズマの学理と応用を分野横断的・俯瞰的に探究する研究活動を展開することを目的とします。これにより次世代を担う高性能で高機能なプラズマ創成の新しい研究のアプローチや方法論を開拓するとともに、それらを牽引する人材育成に貢献します。

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。



2023 年度ユニット活動

核融合プラズマ領域

核融合分野では、国際原子力機関（IAEA）主催の核融合エネルギー会議（FEC）が開催され、研究の進展や方針などが議論されました。また、JT-60SAが初のプラズマ生成に成功しました。ユニット本領域では、中国西南物理研究所（SWIP）との共同研究をすすめています。

国際エネルギー会議と研究の新しい流れ

第29回IAEA核融合エネルギー会議（FEC）が2023年10月ロンドンで開催されました。今回は、核融合が「2050年カーボンニュートラル」の世界的潮流を受けて注目される中、それを反映するものとなりました。また、昨今存在感を示している核融合ベンチャー企業からも多くの報告があるとともに、その背景や役割に関するパネルディスカッションも企画されました。会議では、日本で立ち上がった超伝導トカマクJT-60SAを含む19件のオーバービューと約100件の口頭発表（日本19件）、700件を上回るポスター発表があり、活発な議論がなされました。

本会議に先立って5月には国際プログラム委員会がIAEA本部（ウィーン）で開催されました。日本からは当執筆者（岸本）を含む6名が参加しましたが、上述の核融合ベンチャー企業も含め“相変化”にも似た新しい流れを感じました。実際、磁場方式ではITER、レーザー方式ではNIFが共に燃焼プラズマを実現するフェーズとなり、核融合は複雑ではあるものの夢物語ではないとのイメージを個人的にも持つようになりました。実際、報告された論文にもいくつか特徴がありました。例えば、これまで実験（EXP）と理論（TH）というカテゴリを作りプログラム編集を行ってきていますが、両者が協同して課題を解決するアプローチや人工知能（AI）や深層学習（DL）を駆使して課題を解決する新しいアプローチが急速に増えている点です。また、最先端技術（高温超伝導技術やレーザー技術など）を短期に導入することにより、（磁場強度や加熱パワーなど）対象とするパラメータ領域を大きく広げている点です。

JT-60SAのファーストプラズマの実現と期待

これまで多くの成果を挙げたJT-60の後継として、ITERの目標達成の先導支援研究やデモ炉に向けた先進的運転手法の開発を主目標に据えた超伝導トカマクJT-60SAが13年を上回る歳月をかけて2020年に組立てが完了しました。第29回FECの終了直後の2023年

10月23日にfirst plasmaの生成に成功とのプレスリリースがあり、QSTのHPにも掲載されました。QST関係者におかれましては、13年を上回る長期に渡って建設にご尽力をされてきたことに敬意を表する次第です。

今後、①運転領域拡大、②MHD安定性制御、③輸送・閉じ込め、④高エネルギー粒子、⑤ペDESTAL・エッジ物理、⑥ダイバータ/SOL/PMI物理の6課題のトピカルグループリーダーのもと、実験フェーズに入ることになります。JT-60SAは日欧共同の装置であるとともに、京大プラズマユニットも参加するJT-60SAオンサイトラボを含む日本の大学・国公立研究機関の中核装置として、学術研究等を幅広い核融合プラズマ研究の進展に資する研究体制の構築が強く望まれます。

中国西南物理研究所との共同研究

本ユニットでは、SWIP 核融合科学センターとトカマクプラズマにおける乱流輸送に関わる共同研究を Center for Transport Barrier (TB) Physics を拠点に行っています。2021年度に学術交流協定に関するMOU 締結を結び、理論・シミュレーションを中心とした研究活動を継続的に行っています。今年度は、同センターのW. Wang博士およびJ.Q. Li教授（理論・シミュレーショングループ長）等とLモードプラズマにおいて観測される分布拘束のパワー依存性やそれをもたらすアバランチ輸送や大域的なバースト現象の効果に関する研究を行いました[Kishimoto et al., Origin of Profile Constraint in Toroidal Plasmas with Different Magnetic structures leading to Transport Barrier, 29th IAEA-FEC (Poster), October 16-21, 2023, London, UK]。同研究所長の一人であるM. Xu教授は、前述の第29回FECオーバービューにおいて、HL3の実験で1MAの放電およびHモードの実現を報告するとともに、外部研究者の提案を受け入れる方針について言及しました。本ユニットメンバーの岸本は同研究所を訪問し、輸送障壁形成の実験の可能性等に関して討議しました。当ユニットとの間で今後の共同研究展開が望まれます。

光量子・基礎プラズマ領域

2023年度は、当ユニットの光量子・基礎プラズマ研究領域における研究課題「Center for HED Plasma Confinement (HED: High Energy Density)」の位置づけで、国内会議・国際会議において、レーザー生成高エネルギー密度プラズマの保持を目的とした研究内容に関して8件の発表を行うとともに、ターゲット作製とシミュレーション結果を検証する実験研究を進めました。以下、その中で代表的な内容を4点取りあげます。

(1) 国際会議「HEDS2023」への参加 (2023年4月21日-4月28日) :

例年4月にパシフィコ横浜にて開催されている国際会議「The Optics and Photonics International Congress (OPIC)」内の専門会議「International Conference On High Energy Density Sciences (HEDS) 2023」において、当ユニット（光量子・基礎プラズマ研究領域）の松井隆太郎助教（京都大学大学院エネルギー科学研究科）が「*Exploring high energy density plasmas with exotic character by the interaction between high intensity laser and CNT/rod assembly*」のタイトルで口頭発表を行いました。本会議は、国内外から光量子に関する幅広い研究者が参加しており、当ユニットの特任教授である阪部周二京都大学名誉教授が共同議長を務めておられます。今年度は、当ユニットの光量子・基礎プラズマ研究領域における研究課題「Center for HED Plasma Confinement (HED: High Energy Density)」の位置づけで、高強度レーザーと波長以下のオーダの微細構造を付与した媒質（ロッド集合体／カーボンナノチューブ）との相互作用を通じて、生成する高エネルギー密度プラズマを水素－ホウ素熱核融合反応をはじめとした様々な応用研究に適用することを目指した試みについて講演し、活発な議論が行われました。共著者には当ユニットの参加メンバーが多数含まれており、当ユニットでの活動内容を国内外に向けて発信する貴重な機会となりました。発表内容を通じて、大阪大学レーザー科学研究所や量子科学技術研究開発機構関西光科

学研究所の研究者との交流を深めることができ、特に阪大レーザー研での高強度レーザー「LFEX」を用いた実験提案についても検討するきっかけとなりました。次年度以降は、これらの研究者との共同研究を通じて、積極的な交流を深めたいと思います。また、OPICの開催に合わせて、関連企業による光科学技術に関する最先端の精密機器や技術に関する国大最大級の規模の展示会「OPTICS & PHOTONICS International Exhibition (OPIE)」も同時開催されており、実験研究を進める上で大変参考になりました。

(2) 国際シンポジウム 「第14回エネルギー理工学研究所国際シンポジウム」への参加 (2023年8月31日-9月1日) :

京都大学エネルギー理工学研究所（京大エネ研）が主催する国際シンポジウム「The 14th International Symposium of Advanced Energy Science」（京都大学宇治キャンパス本館）において、パラレルセミナーの枠組みで当ユニット客員研究員である岸本泰明京都大学名誉教授が「*Experimental attempts for the confinement of laser produced relativistic plasmas aiming at a new pass for neutron free nuclear fusion and various applications*」のタイトルで口頭発表を行い、松井隆太郎助教はポスターセッションにおいて「低密度積層CNTと高強度レーザーとの相互作用の素過程に関する実験研究」のタイトルでポスター発表を行い、京都大学化学研究所で実施して

いる実験結果について報告・議論しました。本シンポジウムは京大エネ研の共同利用・共同研究拠点である「ゼロエミッションエネルギー研究拠点」の枠組みで毎年実施されており、今年度は岸本泰明名誉教授（研究集会開催研究予算・受け入れ研究者：エネ研松田一成教授）、松井隆太郎助教（拠点利用研究予算・受け入れ研究者：松田一成教授）が申請・採択されています。

（３）プラズマ・核融合学会

第40回年会への参加

（2023年11月27日）：

プラズマ核融合学会年次大会（岩手県・盛岡市にて開催）において、当ユニット客員研究員である岸本泰明京都大学名誉教授および松井隆太郎助教が口頭発表を行いました。岸本名誉教授の講演タイトルは「慣性時間を越えた水素・ホウ素核融合領域の熱化プラズマの生成・保持と実験検証に向けた取組み」で、当ユニットの光量子・基礎プラズマ研究領域が目標とする「レーザー生成高エネルギー密度プラズマの保持」に向けた理論・シミュレーション、および、実験研究に向けた取り組みを紹介されました。講演では磁場核融合の専門家からの質問も多く、本テーマに関する関心の高さが伺えました。松井助教は、当ユニットが扱っている微細構造を付与した媒質に高強度レーザーを照射する実験を2021年に理研SACLAで実施したことを踏まえ、その解析に関する理論・シミュレーション結果について発表しました（講演タイトル：「高強度レーザー照射された微細構造ターゲットのマルチスケールのエネルギー輸送と長時間膨張・緩和ダイナミクス」）。レーザー生成プラズマのダイナミクスを「マルチスケール性」の視点で整理した点は興味深かったようで、磁場核融合を専門とする研究者からの質問が多数ありました。

（４）実験研究

（京大化研・T⁶レーザーを用いた実験）：

当プラズマユニットの「光量子科学研究領域」では、従来の理論・シミュレーション研究で得られたアイデアをもとに、ターゲットの独自開発・作製と、作製したターゲットを用いた実証実験に取り組んでいます。今年度は、昨年度までに蓄積した実験のノウハウや知見をもとに、化学研究所時田茂樹教授、升野振一郎研究員のサポートの下、高強度レーザー照射実験を実施して一定のデータを蓄積してきました。ターゲットは、京都大学の吉田キャンパスにあるナノテクノロジーハブ拠点において、電子線リソグラフィやプラズマエッチング技術を用いて、最先端の高精度装置群を使用して岸本名誉教授、松井助教、林直仁修士課程学生が中心となって作製を行いました。レーザー照射実験では、エネ研の松田教授にご提供いただいたカーボンナノチューブ（CNT）を用いた照射実験を実施し、電子のエネルギースペクトルを測定しました。今後は、計測機器を充実させ、当ユニットの学内外のメンバーと連携を深めながら、当ユニットの目標である「高エネルギー密度プラズマの保持」に向けた検証実験を進めていきたいと考えています。本結果は2024年1月に開催されるレーザー学会第44回学術講演会で発表し、2024年4月に実施されるHEDS2024においても発表を行う予定です。



図1：京都大学ナノテクノロジーハブ拠点での作業の様子。深掘りエッチング用のサンプルの貼り付け（左）と電子線リソグラフィ用のレジスト塗布（右）を行う岸本泰明客員研究員。

国際学会

「International conference on research and application of plasmas (PLASMA2023)」

(September 18-22, Warsaw, Poland) 参加報告

令和5年(2023年)9月18日～9月22日の期間、京都大学大学院エネルギー科学研究科の松井隆太郎助教(光量子研究領域)がポーランドの首都ワルシャワで開催された国際学会「PLASMA2023」に参加し、ポスター発表を行いました。本学会は、東欧諸国のプラズマ研究者間の情報共有の促進と連携を深めることを目的として発足したのですが、最近では米国やアジア諸国を含めた幅広い地域の研究者が参加しています。本学会は日本国内ではあまり知られていない状況ですが、2022年度に松井助教が受け入れ研究者として来日・滞在されたŁukasz Syrocki博士研究員(ニコラウス・コペルニクス大学)が帰国後に着任した研究所「Institute of Plasma Physics and Laser Microfusion (IPPLM)」が主催しており、Łukasz Syrocki氏に招聘される形での参加となりました。2023年度は磁場核融合、慣性核融合(レーザー核融合)、実験室宇宙物理などの分野から30件の口頭発表と60件のポスター発表が行われました。松井助教は、高強度レーザーを照射したプラズマ中でプロトンをサブGeV領域にまで加速するメカニズムを発見したことを踏まえ、“Relativistic rocket acceleration by excitation and bifurcation of nonlinear waves in plane solid hydrogen irradiated by high-intensity laser”のタイトルでポスター発表を行いました。

学会では医療応用を目的とした粒子線源の開発を目指した研究に関する発表も複数あり、また世界最高強度のレーザー施設「Eli-beamlines」の受け入れ責任者が参加していたことなどから、これらの研究者との意見交換・情報共有を行い、新たなコミュニティを開拓することができました。磁場核融合領域では、欧州が所有するトカマク装置「JET」に関する話題が中心でした。学会中のラボツ

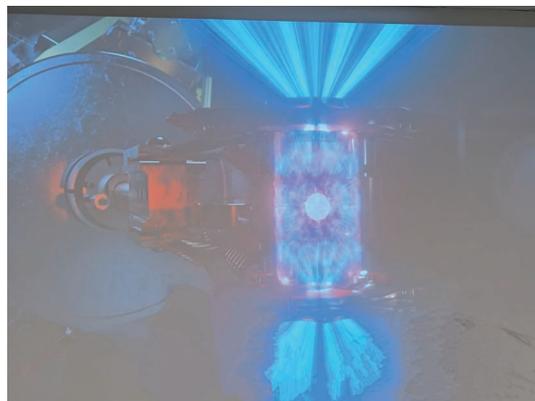


図1：招待講演で示されたNIFでの点火の様子を示した図。

アーでは、IPPLMが所有するzピンチ型の核融合実験装置を見学しました。慣性核融合領域では、2022年12月に米国ロスアラモス国立研究所の大型レーザーNIFを用いてQ値約1.5(約2メガジュールのインプットエネルギーに対して約3メガジュールのエネルギー生成)を達成したことを受け、関連研究者による同トピックスについての招待講演がありました。今後も継続した連携を図りたいと考えています。

ポーランドの首都ワルシャワは、ノーベル賞受賞者であるマリー・キュリー博士が生まれ育った街でもあります。生家が「旧市街」と呼ばれる地区にあり、晩年を過ごした書斎が現存しており、実際に使用していた実験器具が展示されていました。



図2：ポーランド出身の科学者マリー・キュリー博士の生家にて。博士が晩年を過ごした書斎が現存。

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6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190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 として行っています。

第 28 回 2023 年 5 月 17 日

「Study of fast ion effects on zonal flow generation using Hasegawa-Mima equation」

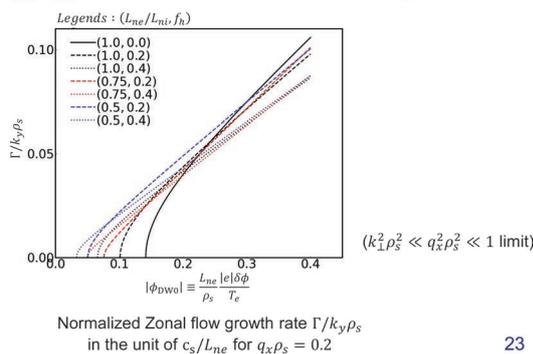
Prof. Taik Soo Hahm
(Seoul National University)



Fast ions' effects on turbulence-driven zonal flow generation are investigated in the context of a simple reduced model based on the Hasegawa-Mima equation. Fast ions' much higher characteristic frequency of parallel motion in comparison to the drift wave's phase velocity along the magnetic field facilitates a derivation of the reduced model equations. Nonlinear mode coupling analyses show that the threshold amplitude of drift wave required for the zonal flow modulational instability is significantly reduced, making its generation easier. This occurs as a down-shift of the drift wave's frequency and a reduction of dispersion in the presence of the fast ions cause a decrease of the mismatch between the primary drift wave frequency and the zonal flow modulated sideband drift wave's characteristic frequency. This finding could be a common nonlinear physics mechanism behind numerous recent results on tokamak plasma confinement enhancement caused by the fast ions.

Fast Ions make Zonal Flow Generation easier

- Presence of fast ions ($f_h \neq 0$) and reduction of the main ion density gradient $|L_{ne}/L_{ni}|$ lower the threshold for the zonal flow generation.



23

「ExB Zonal and Vortex Flows in a Magnetic Island; Role of Symmetry Breaking」

Prof. Taik Soo Hahm
(Seoul National University)

Magnetic island-turbulence interaction is a prime example of multi-scale physics in plasmas[1]. ExB shearing rate associated with vortex flow inside a macroscopic magnetic island has been investigated. In the derivation, quasi-helical symmetry of a magnetic island (MI) has been utilized. Due to the elongation of the MI and incompressibility of the

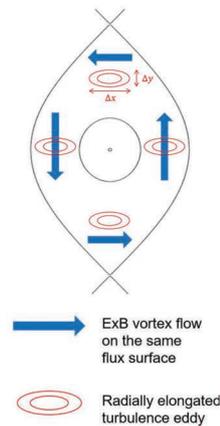
ExB flow, the shearing rate near X-points is much lower than that near the mid-plane of the MI on the same flux surface. This calculation of ExB shearing profile and, in particular, minimal ExB shear near the X-points [2] is consistent with the recent experimental finding that turbulence tends to spread into an MI through regions around the X-points [3]. In addition, the vortex tends to be well-sustained in a large MI [4]. Similarities with the previous corresponding works in axisymmetric tokamak geometry [5,6] will be discussed.

- [1] A. Ishizawa, Y. Kishimoto, and Y. Nakamura, PPCF 61, 054006 (2019)
- [2] T.S. Hahm et al, Phys. Plasmas 28, 022302 (2021)
- [3] K. Ida et al., Phys. Rev. Lett. 120, 245001 (2018)
- [4] G.J. Choi and T.S. Hahm, Phys. Rev. Lett. 128, 225001 (2022)
- [5] T.S. Hahm and K.H. Burrell, Phys. Plasmas 2, 1648 (1995)
- [6] M.N. Rosenbluth and F.L. Hinton, Phys. Rev. Lett. 80, 724 (1998)

E×B Shearing Rate in a Magnetic Island II.

$$\omega_{E \times B} = \frac{k_y W}{2} \sqrt{1 - \left(\frac{\rho}{W}\right)^2 \sin^2 \chi} \left(\frac{\Delta \rho}{\rho \Delta \chi} \right) \left| B \rho^2 \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \psi_\rho^2} \right|$$

- MI-geometry specific form factor:
 1. Even a thick MI is elongated.
 2. E×B flow is incompressible.
 3. B_χ vanishes at X-points: $(\rho, \chi) = (W, \pm \frac{\pi}{2})$



Comment

トカマクおよびヘリカル・ステラレータ磁場閉じ込め核融合実験装置は、入れ子状の磁気面を形成することによりプラズマを閉じ込める。この磁気面はプラズマの不安定性により自発的に破壊され、あるいは外部から加えられた摂動により強制的に破壊され、プラズマ閉じ込めの悪化を招くことが理解されている。近年、この磁気面破壊を積極的に利用してエッジローカライズドモードの制御や内部輸送障壁形成に利用する研究成果が報告されている。したがって、この磁気面破壊によって生じる磁気島と乱流の相互作用を理解することは、プラズマの輸送を理解し予測するうえで重要な研究課題である。磁気島と乱流の相互作用は直接の相互作用または磁気島内の流れを介した間接相互作用に大別される。本セミナーでは、磁気島内の流れに着目した研究の成果が発表された。この研究により、磁気島の外側境界であるセパトロクス近傍において、磁気島内のO点近傍で流れのシアが強く、一方、X点近傍では流れのシアが弱いことが示された。この結果は、磁気島のX点近傍の方が流れのシアによる乱流抑制が弱く、X点近傍で乱流拡大が強くなる実験結果を説明する。(石澤)

「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

古川 勝 教授
(鳥取大学)



理想MHD (磁気流体力学) 方程式は、ハミルトニアンとポアソン括弧を使って非正準ハミルトン系として書ける。ポアソン括弧の歪対称性によりエネルギーが保存し、そのヌル空間としてカシミール不変量が存在する。カシミール不変量が同じ値を取る無数の状態の中で、エネルギー極値となる状態が平衡である。ポアソン括弧を元にし、カシミール不変量を保持したままエネルギーが単調変化できるように作った人工的な発展方程式を解き、エネルギー極値に至らしめようとするのが疑似アニーリングという方法である。本セミナーでは、1 回目に有限自由度の例も含めて基礎的な部分を、2 回目に簡約化MHDの平衡・安定性問題への応用例について述べる。

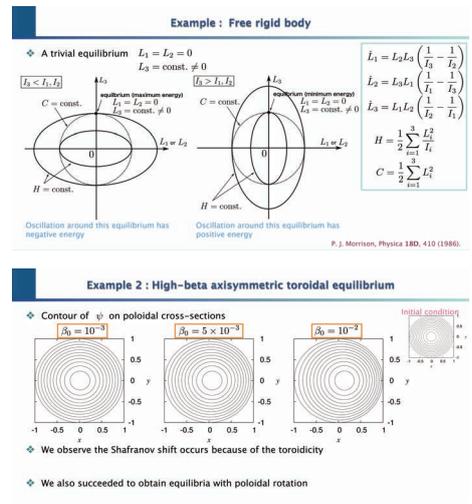
- [1] G. R. Flierl, P. J. Morrison, Physica D 240, 212 (2011) .
- [2] 古川勝, プラズマ・核融合学会誌 94, 341 (2018) .
- [3] M. Furukawa and P. J. Morrison, Phys. Plasmas 29, 102504 (2022) .

Comment

超高温の微小散逸の荷電粒子多体系であるプラズマは理想MHD流体として記述され、その方程式系において様々な閉じ込め装置の“平衡”を求めることは核融合研究の基本と言えます。特に、最近では、大域的なMHDモードの影響を受けて準定常的にヘリカル変形をしていたり、その一つとして磁気島が安定に存在していたり、その磁場がスタカスティックになっていたりと、複雑な3次元性を内包した平衡が重要な役割を果たすことが指摘されています。今回のセミナーでは、古川氏に、非正準座標のハミルトン力学として記述される理想MHD流体の支配方程式の構造に由来する保存量 (Casimir 不変量) を利用し、その制約のもとで平衡を求める試みについてセミナーを行っていただきました。第1週目はその数学的な基礎、2週目は簡約MHD方程式系などに適用した応用についてお話いただきました。

非正準運動論は、ジャイロ運動論モデルに基づく乱流輸送研究や複雑な摂動磁場下での保存性を保った相対論粒子軌道研究などで多少馴染みがあったものの、いずれもダイナミカルな系に適用されています。これを静的な平衡の問題に適用するのはすくぬきはイメージできませんでしたが、これらはハミルトニアンの幾何学的な対称性に起因するもの (Noether 定理) である一方、現問題は (ハミルトニアン構造に依存することなく) 非正準座標で表現されたPoissonテンソルに関わる保存性 (Casimir 不変量) によるものであり、その拘束のもとでのエネルギー極小値に向けて緩和させることで平衡に導くアプローチと理解しました。粘性を含む方程式系では緩和過程で当該不変量も変化してしましますが、本アプローチではその保存性が確保されるため、前述のような複雑な系に発展できる可能性を示しています。

セミナーでは、2回にわたって60名におよぶ参加者のもと、平衡状態の初期値依存性や温度・密度などのプラズマ分布の効果などについて質問が出され活発な議論がともに2時間を上回ってなされました。個人的には、核融合の実現という開発研究が精緻な学理で支えられるとともに、ITERなど高温で微小散逸のプラズマ理解の学術基盤として研究が深化しているとの印象を強く受けました。また、本アプローチが、波と粒子の相互作用が含まれるブラソフ方程式の運動論的平衡 (BGK 平衡など) にも適用できれば、さらに役割が増すとともに、興味が湧きました。関連して、電磁的ジャイロ運動論に基づく長時間シミュレーションが可能になれば、多様な揺らぎの動的プロセスが系の平衡状態をゆっくり変えていくことから、本アプローチはそのような問題とも連携・結合するようにも思われました。(岸本)



2週にわたる球状トカマク (ST) セミナーの実施

2023年10月にロンドンで開催された第29回核融合エネルギー会議 (FEC) では、球状トカマク (ST) に関する研究が多く報告され、コンパクトで高性能な核融合炉実現のアプローチとしての期待の大きさを物語っていました。日本では九州大学応用力学研究所において2008年に国内最大の球状トカマク装置 QUEST (Q-shu University Experimental with Steady-State Spherical Tokamak) が立ち上がるとともに、日本国内の関連コミュニティがそれぞれの得意分野で一定の役割分担のもと、当該研究を加速する全日本ST計画が開始された経緯があります。最近では、英国に拠点を置く Tokamak Energy Ltd が同社の球状トカマク ST40 (主半径40cm 強) において1.8MW のNBI入射を行うことで約1億度のイオン温度を民間企業で初めて達成し、FEC会議でも大きな話題になりました。

京都大学でも球状トカマク LATE (Large Aspect Ratio Torus Experiment) を用いた様々な基礎研究を行っていますが、本年度から核融合プラズマ研究領域に、これまでの Center for Transport Barrier Physics に加えて、Center for Spherical Torus (ST) Physics (責任者: 田中仁教授) を立ち上げ、全日本STとも連携してST研究を一層進めたいと考えています。これらの状況を受け、当ユニットでは、QUESTの発足時に全日本ST研究の初代リーダーとして当該研究をリードされ、2021年度より上述の Tokamak Energy Ltd において研究活動を展開しておられる高瀬雄一氏 (Tokamak Energy 技術アドバイザー)、および、全日本ST研究の中で長期に渡って九州大学で QUEST 研究をリードしてこられた九州大学の花田和明教授に2週にわたりセミナーを行っていただきました。高瀬氏には Tokamak Energy が立ち上がった経緯や研究方針とともにST40の成果、花田氏にはSTの重要な特徴である低いアスペクト比が果たす役割と背景物理についてお話しいただきました。双方とも、40名以上の関連研究者・学生の方々に参加いただき、議論を中心に2時間を大きく上回るセミナーとなり、関心の高さが伺われました。本ユニットの Center for ST Physics も両名とも連携しながら高性能でコンパクトなSTベースの核融合炉に向けた研究を推進していきます。

第32回 2024年1月16日

「トカマクエネルギーにおける核融合開発」

Fusion Development at Tokamak Energy

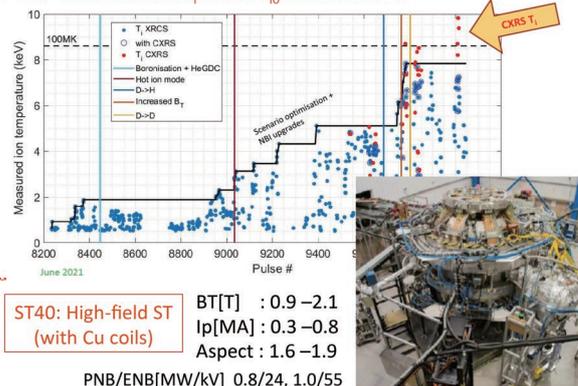
Yuichi Takase, Senior Technical Advisor
(Tokamak Energy Ltd.)



英国トカマクエネルギー社[1]では、低アスペクト比トカマクと高温超伝導 (HTS) コイルを組み合わせ、早期の商用核融合炉実現を目指している。小型球状トカマク ST40 を使い、既に核融合燃焼に必要なイオン温度1億度を達成しているほか、核融合炉で必要となる技術の開発を行っている。HTSコイル開発では、20Kで24T (世界記録) の達成、クエンチ耐性の大幅な向上の実現のほか、球状トカマク配位のHTSコイルシステムの試験を開始している。また、これらの技術を商品化するため、マグネット事業ユニットを創設し、事業開拓を開始している。本セミナーでは、これらの活動について報告する。

[1] Commercial Fusion Energy - Tokamak Energy

D⁰⇒D⁺ and increased B_T raised T₁₀ over 100 M °K



Comment

日本では昨年4月のフュージョンエネルギー・イノベーション戦略の策定後、ITER計画/BA活動、原型炉開発と続く従来のアプローチに加え、産業化等の多面的なアプローチにより核融合エネルギーの実用化を加速する施策が取られ、昨年末12月26日開催の総合科学技術・イノベーション会議においては、ムーンショット型研究開発制度が目指すべき第10番目の目標として、「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」が決定されたところでした。このような状況下で、小型球状トカマクST40を用いて民間企業として世界一の核融合三重積を達成し、さらに独自の高温超伝導コイルの作製技術を開発して、短期的な利益の追求も目指すというトカマクエナジー社のお話は、非常に多くの興味を引かれ、リモートでの参加者は50名を越え、活発な質疑応答が行われました。

ST40の実験でトロイダル磁場強度 $B_t \sim 2T$ の領域まで閉じ込め時間の強い B_t 依存性が示されたことは球状トカマクST（アスペクト比 $A=1.6 \sim 1.9$ ）の有利な点であり、従来のトカマク（アスペクト比 $A=3 \sim 4$ ）との大きな違いとも言えます。炉設計上、センターポストの中性子シールドの必要性和装置サイズの制約を考えると A は2以上にせざるを得ないというお話もあり、アスペクト比 A に対する依存性に興味があるところです。トカマクエナジー社の考える次期装置STXでは $A=2$ で規格化ベータ $\beta_N=3 \sim 4$ を狙うとのこと。ST80からの変更の速さも民間企業ならではのと感じました。ST40での実験は今年4月以降再開されるとのことで、Hモードによる閉じ込めの更なる改善が期待されます。また、今年度統合試験が終了し、2年間の増力期間の後に運転が再開される $A=2.4$ のJT-60SAの実験はSTと従来トカマクの間を埋める重要な使命を帯びていることを改めて認識させられた次第です。（田中）

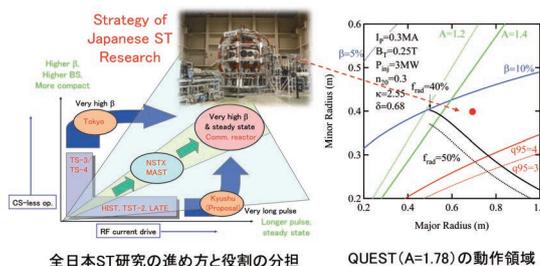
「トラスプラズマのアスペクト比がもたらすこと」

What aspect ratio of torus plasma brings

花田 和明 教授
(九州大学応用力学研究所)



フュージョン・エネルギーを活用するために1億度を超える高温のプラズマを数m規模の入れ物に閉じ込めておかななくてはならない。燃料粒子の速度は数百 km/秒に達するため直線形状の両端をつなぎ合わせて終端を持たないトラスが入れ物として採用される。このアイデアは一見すると単純なことに思えるかもしれないが、トラス形状にすることで様々な新たな概念が導入される。磁場勾配や遠心力によるドリフト、磁場の強弱によるミラー効果と捕捉粒子、新古典輸送等で、この効果を表す指標の一つがアスペクト比である。トラスの主半径と副半径の比であるアスペクト比は2以下になると顕著な効果を発現する。例えば悪い曲率の磁力線の長さが短くなることで圧力駆動の不安定性が低減されて高 β (β はプラズマ圧力に対する磁気圧の比)プラズマを得ることが可能となったり、プラズマの性能に良い貢献をするプラズマ電流を高くできたりする。この効果を最大限活用する配位を球状トカマクと呼ぶ。球状トカマクは、近年研究の進捗が目覚ましく、そのアスペクト比がもたらす恩恵を遺憾なく発揮している。本講演ではアスペクト比が何をもち、最近の研究成果の何と対応しているのかを簡単に解説する。



- [1] J. Plasma Fusion Res. Vol.88 No. 12 (2012) 706-760 球状トカマク研究の進展
—核融合エネルギー開発に向けて—

Comment

本セミナーでは、ベータ値限界、楕円度(断面積)、準磁場特性、電流分布、自発電流、古典輸送、乱流輸送など、トラス系において重要な物理パラメータに対するアスペクト比(A)依存性を俯瞰することで、同じ軸対称系のトカマクとも比較しながらSTの特徴を浮き彫りにしていただきました。

同じトラス系でも異なる特徴を持つ多様な装置がありますが、共通の物理量を指標(軸)に異なる装置を俯瞰することで現象アプローチの意義を再認識しました。特に興味深かったのは、アスペクト比を媒介としたエネルギー閉じ込め時間に対する磁場や電流および衝突頻度の依存性です。トカマクでは $\tau_{E(\text{tokamak})} \propto B_T^{0.15} I_P^{0.93}$ ($\tau_E \propto v_*^{0.19}$) であるのに対して、STでは $\tau_{E(ST)} \propto B_T^4 I_P^{0.5}$ ($\tau_E \propto v_*^{-1}$) となるとの説明をいただきました。STと言えば高ベータ値実現の観点からトロイダル磁場強度が低い印象がありますが、高イオンモードを実現しているST40 (Ti~9keV) は1.9T、GLOBUS-M2 (Ti~4keV) は0.9Tなど、共に磁場強度が高いことから、昨今の高温超伝導技術の進展を背景にしたSTへの期待の背景がよく分かりました。また、衝突頻度依存性を見ても高温にする核融合の目標に対して自然が味方してくれている印象を持ちました。

それらに呼応して、QUESTにおいても強磁場を検討している状況とともに、それを見据えた電流駆動法の開発やアスペクト比を変化させることでSTとトカマクの領域を跨いで乱流特性を計測・検証する将来計画に言及されたのが印象的でした。花田氏がセミナーのまとめとして、「これまで全日本ST計画は“高ベータ値”を目指した方針と“長時間プラズマ維持”の二つを軸でプログラムを組んできたが(スライド左図参照)、今後はそれらを統合する方向である・・・」との述べられたのが印象的でした。昨年(2023年10月)にトカマク放電に成功した大型超伝導トカマクJT-60SAのアスペクト比A=2.5はトカマクでは小さくSTの特性も併せ持つ装置として設計されていることから、QUESTと連携して本装置を積極的に双方向的・相乗的に利用したST研究の展開が期待されます。(岸本)

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 囃興 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)	非線形科学を通じ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分光計測と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 (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

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科	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科	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科	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科	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科	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科	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
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
蓮尾 昌裕	教授	大学院工学研究科	機械理工学専攻
四竈 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
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
稲垣 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
南 貴司	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
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
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
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
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
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
森井 孝	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
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
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
橋田 昌樹	特任教授	東海大学 総合科学技術研究所	
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	
浅井 朋彦	教授	日本大学 理工学部	
桐山 博光	グループリーダー	量子科学技術研究開発機構	量子技術基盤研究部門関西量子科学研究所
森林 健悟	上席研究員	量子科学技術研究開発機構	量子生命・医学部門量子生命科学研究所
坂和 洋一	准教授	大阪大学 レーザー科学研究所	
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
阪部 周二	特任教授	非線形・非平衡プラズマ科学研究ユニット	
木下 正弘	特任教授	非線形・非平衡プラズマ科学研究ユニット	
吉田 麻衣子	特任教授	非線形・非平衡プラズマ科学研究ユニット	
	グループリーダー	量子科学技術研究開発機構	量子エネルギー部門那珂研究所
今澤 良太	特任准教授	非線形・非平衡プラズマ科学研究ユニット	
	主幹研究員	量子科学技術研究開発機構	量子エネルギー部門那珂研究所
岸本 泰明	客員研究員	非線形・非平衡プラズマ科学研究ユニット	

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