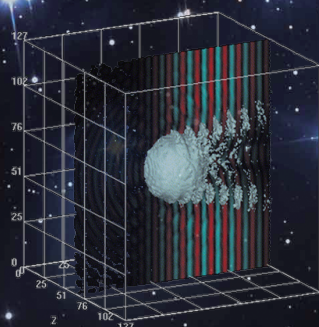
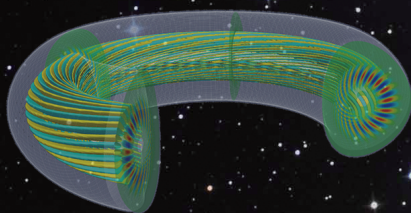


非線形・非平衡 プラズマ科学 研究ユニット

—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 2022



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

CONTENTS

- ごあいさつ
- ユニットについて
- 2022年度ユニット活動
- プラズマ科学セミナー
 - 佐々木 明 専門業務員（QST 関西光科学研究所）
 - 相羽 信行 上席研究員（QST 那珂研究所）
 - 伊藤 篤史 准教授（核融合科学研究所）
 - 坂本 宜照 グループリーダー（QST 六ヶ所研究所）
 - 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）
- 【コラム】「ゼロエミッションエネルギー」研究拠点とは？
- アクティビティカレンダー
- メンバー一覧

ごあいさつ — 新ユニット長として本年度の活動を振り返って —

非線形・非平衡プラズマ科学研究ユニットは令和2年2月に発足し、今年度で実質3年目の活動となりました。本ユニットを立ち上げ、これまで活動を牽引してこられた岸本先生が昨年度をもちましてご退職となりましたので、その後を引き継いで私がユニット長を拝命いたしました。ユニットならびに関連部局の教職員の皆様のお力添えを得て、無事今年度も活発な活動を行うことができました。ここに厚くお礼申し上げます。

今年度は化学研究所から時田先生方に新たなメンバーとして参加いただくとともに、特任教授に京都大学名誉教授の阪部周二先生と木下正弘先生を、また、量子科学技術研究開発機構からは吉田麻衣子先生を特任教授に、今澤良太先生を特任准教授にお迎えし、ユニットの活動に参加いただくことができるようになりました。そして、岸本先生には客員研究員として引き続きユニットの活動を支えていただくこととなりました。今後も核融合プラズマ研究領域、光量子・基礎プラズマ研究領域、非線形・非平衡プラズマ数理研究領域の三つの研究領域につきまして、研究活動を活発化するとともに相互連携、分野横断型の交流が図れるように努めていきたいと思っています。

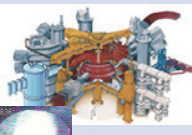
さらに、エネルギー科学研究科国際先端エネルギー科学研究教育センターにおいて、先進未来エネルギー科学のための共創プラットフォーム構築を目的として整備されました「先端エネルギー科学実験棟」におきまして、球状トカマク装置 LATE とともに、国際共同研究の機能を利用することで、同実験棟を拠点としたユニットの活動を展開していきたいと思っていますので、今後ともご支援を賜りますよう、よろしくお願い申し上げます。

ユニット長 田 中 仁

核融合プラズマ研究領域

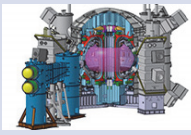
超伝導トカマクJT-60SA (QST・日欧) の完成(2020)およびITER (国際熱核融合炉) の完成 (2025) と核融合プラズマ実験研究の進展

臨界プラズマ実験装置 JT-60 (1985–2008)



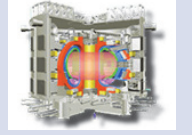
自己組織化による高性能プラズマの実現 (謝辞：那珂研究所)

超伝導トカマク型実験装置 JT-60SA (2020 完成)

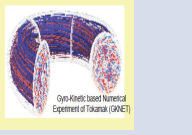


<https://www.qst.go.jp/site/jt60/5150.html>

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)

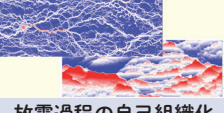


<https://eli-laser.eu/>

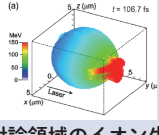
G. Mourou
D. Strickland
CPA 極短パルスレーザー
2018年ノーベル物理学賞



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

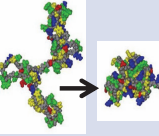


相対論領域のイオン生成

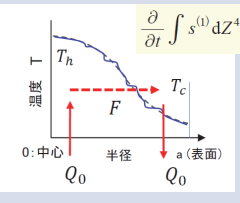
非線形・非平衡プラズマ数理研究領域

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)

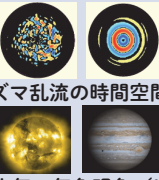


大域的なエントロピーバランス

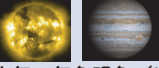


$$\frac{\partial}{\partial t} \int s^{(1)} dZ^4 + \frac{\partial}{\partial x} \int v_x s^{(1)} dZ^4 = G(x)$$

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。

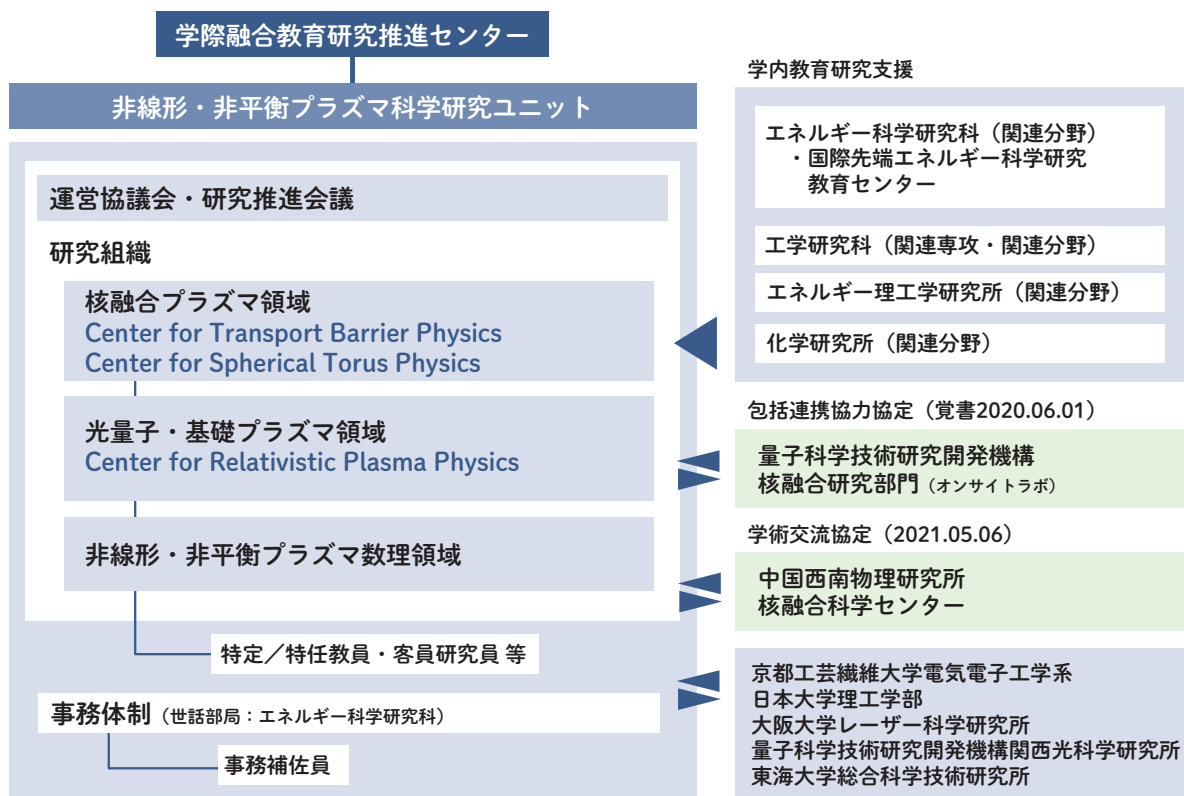
具体的には、安全性の高い恒久的なエネルギー源の実現を目指した「核融合プラズマ研究」、近年急速に発展している高強度レーザーを利用することで新領域の学術・応用研究の実現を目指した「光量子・基礎プラズマ研究」、それらの学術基盤である「非線形・非平衡プラズマ数理研究」の三つの領域に焦点を絞り、限られたグループや単独部局では利用が容易でない国内外の先端施設を利用する枠組みの構築なども含め、学内外の関連部局の研究者が連携・協力することで当該分野の未解明の問題に挑戦します。

ユニットの組織構成

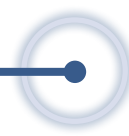
本ユニットは、学際融合教育研究推進センターのもと、エネルギー科学研究科を担当部局とするとともに、プラズマを含む幅広い先端エネルギーに関する国際共同利用研究を推進する同研究科国際先端エネルギー科学研究センターとも連携しつつ、上述の3領域研究の専門家や世話部局の部局長・事務長を

含む運営協議会でユニットの方針を定めるとともに、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。

各領域では、参加メンバーの動機に基づいて行う特定課題を“Center”として位置付けて研究活動を展開します。今後は、核融合プラズマ領域に新たに“Center for ST (Spherical Torus) Physics”を設けて、将来のコンパクトで高性能な核融合プラズマ実現に向けた国際連携研究活動を推進する予定です。



2022 年度ユニット活動



プラズマ科学セミナー

豊富で多様な知見を有する研究者が集い、分野横断的な連携・交流を行うことで、パラメータ領域の大きく異なる核融合プラズマや光量子プラズマの新たな可能性の追求・展望を目的として開催しています。本セミナーは、プラズマに内包する物理過程を中心に、プラズマの分野に限らない多様な分野の最先端研究の動向や成果などを discussion seminar の形式で発表中にも自由な意見交換を行うことにより、より深い議論を進めています。詳細は次章となりますが、今年度は計5回の会合を実施しました。

Joint International Discussion Seminar in Plasma UNIT

Hyeon K. Park教授に本ユニットを訪問いただき、同先生を囲んで小規模の研究集会（Joint International Open Discussion Seminar）を開催しました。Park先生は、米国プリンストンプラズマ物理学研究所（PPPL）の大型トカマクTFTRで長期に渡って活躍された高度なプラズマ計測を基礎においた研究者であり、その後、韓国のUNIST（Ulsan National Institute of Science and Technology）に移籍された後、当時の韓国NFRI（現KFE: Korea Institute of Fusion Energy）で開始された超電導トカマクKSTARの実験長を務められました。トラス系プラズマ中に発生する鋸歯状振動（sawtooth）や新古典ティアリングモード、アルフェン固有モードやELMと呼ばれる周辺部局在モードなどの揺らぎ3次元構造をECEI（電子サイクロトロン放射イメージング）などによる先進計測を実現するとともに、それを理論・シミュレーションと詳細に比較することにより、揺らぎの発生メカニズムや抑制方法などの研究を行っておられます。本学から同様に揺らぎの計測を専門とされる田中仁先生等（重イオンビームプローブ計測など）に、本学の球状トラス装置のLATEで計測されているバースト的なプラズマ掃き出し現象について、南貴司先生（トムソン散乱計測など）にはヘリオトロンJ装置で観測されている電子の内部輸送障壁とその時に観測される磁気島のダイナミクスについての最新の研究成果を報告いただきました。オンラインと併用で開催したことから、中国西南物理研究所（SWIP）や浙江大学核融合理論・シミュレーション研究所からの参加もあり、活発な意見が交わされました。

Park先生は、核融合プラズマ研究において、理論式に頼らない実験計測によって提案されている理論・シミュレーションモデルとの Validation & Verification (V&V) を行い、それを通して未知現象の背景にある理論モデルを構築していくことの重要性を指摘されています。長年による当該分野の成果と貢献に対して、2020年にアジア・太平洋物理学会連合プラズマ物理分科会（AAPPS-DPP）のチャンドラセカール賞を受賞されています。本ユニットでは、毎年、京都大学・UNIST間で、“Physics validation and control of MHD instabilities and turbulent transport in fusion plasmas”を開催していますが、Park先生の訪問中、これらの交流を深めて、今後の韓国KSTAR等を含めた実験提案や、核融合プラズマの未解明課題に対してV&Vアプローチにより研究活動を展開することなどの意見交換を行いました。

Joint International Discussion Seminar in Plasma UNIT with Prof. Hyeon Park (UNIST)

April 11-12, 2022, Uji Campus, and ONLINE

April 11 (Monday), 2022

“Island dynamics and ITB formation in Helioton-J plasmas” by T. Minami

“Kruskal Shafranov limit in sawtooth study” and “MHD physics on KSTAR” by Prof. Hyeon Park

April 12 (Tuesday), 2022

“Anisotropic pressure equilibrium and plasma bursting event in the spherical tokamak, LATE” by H. Tanaka and R. Kajita

“Limitations of the current MHD Physics of the tokamak plasmas” by Prof. Hyeon Park

外国人共同研究者の受入れとプラズマ原子過程のモデル化に関する研究会

令和4年（2022年）7月3日～9月28日、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を受入れ研究者として、ニコラウス・コペルニクス大学（ポーランド）よりŁukasz Syrocki博士研究員をユニット光量子研究領域における国際共同研究という位置づけで招へいしました。また、共同研究の一環として開催した研究会の様子もレポートいたします。

Łukasz 氏の招へいについて

Łukasz氏は原子分光学、特に核融合原子炉において生成するプラズマ温度診断の専門家（理論・シミュレーション）であり、電子捕獲過程による核励起に関して、核物理学と原子物理学の境界領域を研究対象とされています。同氏の原子物理学の知見とトカマクやZピンチなどの磁場プラズマ研究の実績を生かし、光量子研究領域の研究課題「Center for Relativistic Plasma Physics」において取り組んでいる高強度レーザー生成プラズマ中の磁場計測に関する国際共同研究という位置づけで招へいしました。

研究会の実施について

この共同研究の一環として、QST量子生命・医学部門量子生命科学研究所の森林健悟先生、元京都大学化学研究所の伊藤嘉昭先生、京都大学名誉教授で当ユニット特任教授の阪部周二先生をお招きして、9月21日（水）に「プラズマ原子過程のモデル化に関する研究会」を実施しました。司会進行は京都大学名誉教授で当ユニット客員研究員の岸本泰明先生がご担当されました（写真1）。



写真1：研究会の冒頭で趣旨説明をされる岸本泰明名誉教授・当ユニット客員研究員

森林先生からは「Role of Plasma Physics in Heavy Particle Cancer Therapy」というタイトルで、レーザー生成粒子線のがん治療への応用について講演いただきました（写真2）。陽子や炭素イオ

ン等の粒子線は、がん細胞を狙い撃ちできる「ブラッグピーク」の特性を有するため、粒子線を照射することで、少ない線量でのがん治療が実現可能であるとして注目されている手法です。一方で、これらの粒子線のがん細胞のDNAを損傷させるメカニズムは十分には解明されていません。本講演では、粒子と水分子の衝突過程を含む新しい理論モデルを用いた粒子シミュレーション結果について紹介がありました。粒子線が局所領域（軌道付近）に大きなエネルギー付与を行うことでプラズマが発生し、そのプラズマが「クラスターDNA損傷」を引き起こすことでがん細胞を失活させることが示されました。粒子線がん治療装置への応用に資するレーザー駆動型高エネルギー粒子線源の開発は当ユニットの光量子研究領域における研究課題の一つに位置付けています。レーザー駆動型の粒子加速手法においては、粒子の高エネルギー化、指向性とエネルギーの単色性の向上、粒子線量の増大など、実現に向けて多くの課題が残されていますが、本講演でご紹介いただいた、がん細胞を失活させる詳細なメカニズムの解明により、当該分野のさらなる進展が期待されます。

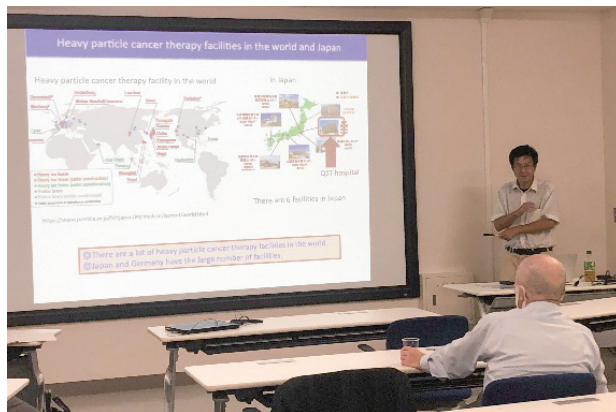


写真2：森林健悟上席研究員の講演の様子

伊藤先生からは、「Multiple ionization phenomena, x-ray satellites, due to photon collisions using a high-resolution double crystal spectrometer, and the application of this spectrometer to the chemical state analysis」というタイトルで講演いただきました。Łukasz氏とX線計測および関連理論に関する共同研究を実施しており、Łukasz氏を

ご紹介いただいたことがこの度の共同研究のきっかけとなりました。

Lukasz 氏からは「Theoretical approach to determine the high-temperature tokamak plasma parameters」というタイトルで講演いただきました。ITER（トカマク）にタングステンを含むプラズマ対向機器が導入予定であり、タングステンの電離によるX線スペクトルを解析する際、十分に高いスペクトル分解能があれば、トカマクで生成された高温プラズマのパラメータ診断（イオン・電子の局所温度）が可能となる新しい手法が提案されています。講演では、JETにおける実験で得られたタングステンとモリブデンのX線スペクトルを、Lukasz氏のグループが提案した理論モデルを用いて再現することに成功し、さらに実験におけるトムソン散乱結果から予測された電子温度を得ることに成功したことが報告されました。講演中は阪部先生や森林先生などから多くの質問コメントがあり、活発な議論がなされました。なお、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」（ZE2022D-01）活動の一環で実施されました。



写真3：レーザー照射用チャンバーでフランジの取り付けを行うLukasz氏。

Lukasz氏の滞在を通して

Lukasz氏の滞在中は、当ユニットの光量子研究領域で取り組んでいるレーザープラズマ相互作用により生成する高エネルギー密度プラズマの密度・温度測定や、プラズマ中に生成するキロテスラオーダの磁場の計測方法等について議論を深めました。また、カーボンナノチューブ（CNT）（試料提供・謝辞：京都大学エネルギー理工学研究所松田一成教授）を使用したレーザー照射実験（京都大学化学研究所T⁶レーザー）に参加し、チャンバー内における光学系の設置や電子のエネルギースペクトルメータの調整・設置作業を共同で行いました。Lukasz氏にとって高強度レーザーを使用した実験参加は初めてのことで、レーザー生成相対論プラズマについてのイメージ形成と理解を深めることができたと思います。今後も継続した連携を図りたいと考えています。（松井）

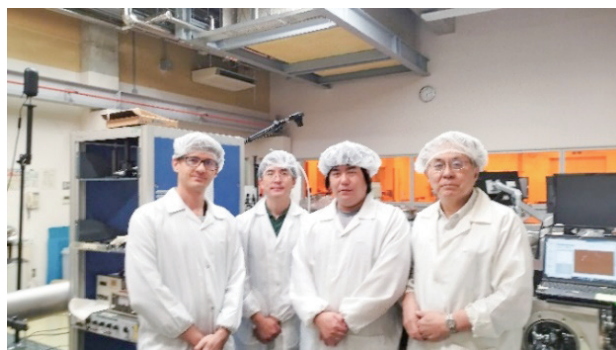


写真4：京都大学化学研究所・T⁶レーザー実験室において、レーザー照射実験時。QST那珂研究所主幹研究員で当ユニット特任准教授の今澤良太先生（左から2人目）にも参加いただきました。

Comment from Lukasz

“Workshop for modeling of plasma atomic process” was very interesting and informative. The presented lectures were of high scientific quality. What's more, they were presented in a very understandable and accessible way, and the discussions taking place after each lecture allowed for a thorough understanding of the presented issues and results. The organization of the Workshop itself was at a high level. I am very happy that I could present the results of my research to such an eminent group of scientists.

Also, my three-month scientific internship at the Laboratory of Plasma and Fusion Science at Kyoto University under the guidance of Professor Yasuaki Kishimoto and Dr. Ryutaro Matsui was very fruitful and informative for me. I could not only devote myself to theoretical research related to the diagnostics of parameters of plasma generated in fusion reactors but also participate in experimental research related to the interaction of lasers with matter. What's more, my stay took place in a very nice and friendly atmosphere and I would like to continue further cooperation with such a nice group.

ルーカス氏からのコメント

「プラズマ原子プロセスのモデリングのためのワークショップ」は、非常に興味深く、有益でした。講演は科

学的に質の高いものでした。さらに、講演は非常にわかりやすく、理解しやすい方法で行われ、各講演の後に行われたディスカッションでは、講演された問題や結果を十分に理解することができました。ワークショップの運営自体も高いレベルにありました。このような著名な科学者の方々の前で、自分の研究成果を発表できたことを大変うれしく思います。

また、京都大学のプラズマ・核融合基礎学分野の研究室で岸本泰明教授と松井隆太郎博士の指導のもと、3ヶ月間のインターンシップを行ったことは、私にとって非常に実り多いものであり、有益なものでした。核融合炉で生成されるプラズマのパラメータ診断に関する理論的研究に専念できただけでなく、レーザーと物質との相互作用に関する実験的研究にも参加することができたのです。さらに、私の滞在はとても素敵でフレンドリーな雰囲気の中で行われ、このような素晴らしいグループとさらに協力関係を続けていきたいと思っています。

QST 那珂研究所におけるオンサイトラボ

本ユニットは、令和2年（2020年）6月にQST核融合エネルギー部門と連携協力に関する協定（覚書）を交わし、同年9月3日には協定締結記念式典を執り行いました（詳細は2020年報告書 P6-10を参照下さい）。この協定は、2023年度に同QST那珂研究所の超電導トカマク装置JT-60SAが運転を開始するに当たり、同サイトに京都大学のオフィス（オンサイトラボ）を置き、そこで教員や学生がJT-60SAの実験・計測や理論・シミュレーションに関する研究活動をQST研究者と協力して行うことを目的としています。写真1は那珂研究所の制御棟、写真2は同制御棟の半地下にあるオンサイトラボを外から窓越しに見たものです。本制御棟の横にJT-60SAの本体棟があり、多くの研究者がファーストプラズマの実現に向けて研究活動を行っています。本執筆者の岸本は、令和4年4月以降、4月、9月、12月の3回に渡って各々1週間から2週間弱、同ラボに滞在し、本ユニットの【核融合プラズマ研究領域】に設置している Center for Transport Barrier Physics に関わる研究活動を行いました。JT-60SAの実験はこれからですが、その前身のJT-60（1985～2008年）は、1998年に換算総倍率 $Q \sim 1.25$ のプラズマの実現（Ishida et al., Phys. Rev. Lett. 79, 3917（1997）など）、2006年には規格化ベータ値 β_N が2を超える高性能プラズマを24秒に渡って実現した実績（Oyama et al., Nucl. Fusion 49, 065026（2009）など）を持っています。これらは、いずれも内部輸送障壁（ITB）と呼ばれる閉じ込め改善機能が現出したプラズマであり、特に後者は、電流の緩和時間を上回って維持されている点が特徴的であり、ITERのハイブリッドシナリオと呼ばれている放電パターンに近いものでした。これらの実現から15年以上が経過しますが、近年、トカマクプラズマの全領域のダイナミクスも再現する大域的なシミュレーションが実現していますが、本 Center は、これら高性能プラズマ実現の背景にある物理過程を明らかにするとともに、制御に向けての学術基盤を開拓することを目指して研究活動を行っています。これまで、以下の研究が行われています。（岸本）

Ishida, Ishizawa et al., Physics of Plasmas 27, 092302（2020）

Imadera and Kishimoto, Plasma Phys. Control. Fusion 65, 024003（2023）

Kishimoto, Imadera et al., Phil. Trans. R. Soc. A 381, 20210231（2023）



写真1：那珂研究所制御棟



写真2：オンサイトラボ（居室）

日韓ワークショップの開催

2023年3月14日-15日の日程で、韓国 蔚山市のUNIST (Ulsan National Institute of Science and Technology) にて 第7回 UNIST-Kyoto U. Workshop on “Physics validation and control of MHD instabilities and turbulent transport in fusion plasma” が開催されました。本研究会は、核融合プラズマ物理における重要課題を抽出し、実験とシミュレーションの双方の側面から検証 (verification) と妥当性確認 (validation) を行うことで、より深い知見を日韓の研究者で醸成することを目的に、京都大学とUNISTの研究者が一同に集い、2015年から開催されています。本年度は、今後、具体的な共同研究を展開する観点から研究課題を絞り、日本側から7名、韓国側から7名に加え、本ユニットとも協力協定を締結しているSWIP (SouthWestern Institute of Physics) から1名の計15件の発表を企画し、コア/ダイバータプラズマにおけるMHD、乱流、輸送現象の詳細な検討が行われました。日本側の発表としては、京都大の岸本氏、石澤氏、今寺から、グローバルジャイロ運動論コードGKNETを用いた解析結果の報告があり、特に「非局所性」の定義や適用範囲については参加者らによって詳細に議論されました。またQSTの矢木氏からはベレット入射等に伴い逆密度勾配が生じた際の粒子輸送について、相羽氏からは、第1壁に大きな熱負荷を与えるELM (Edge Localized Mode) と呼ばれるMHD現象について報告頂きました。また、NIFSの小林政弘氏と小林達哉氏からは、LHDで観測されているダイバータの熱負荷に影響を与える乱流拡散現象や磁気島励起に伴う振動現象について、それぞれ報告頂きました。一方韓国側からは、UNISTのYongkyoon In氏からRMP (Resonant Magnetic Perturbation) 存在下における周辺プラズマと輻射を伴ったSOL (Scrape-Off Layer) 層の相互作用について、KFE (Korea institute of Fusion Energy) のMinjun Choi氏からE×B staircaseと熱アバランチの相互作用、ならびに輸送障壁への遷移の可能性についての実験報告があり、計測技術を含め、着実なKSTAR実験研究の進展を印象付ける発表でした。

今回のホストであるIn氏が最初の挨拶にて、本研究会では、物理現象の本質を同定し、その理解と制御のための解を実験とシミュレーションの双方から見出すことをより重視したいと言及していましたが、ある物理現象に対する実験とシミュレーションの一致/不一致をどう解釈するかに多くの議論が費やされ、その考えに沿った会議になったものと思います。個人的には韓国料理がどれもおいしかったことも印象的でした。(今寺)



会議終了後の集合写真。一番右の方が今回のホストのYongkyoon In氏 (UNIST)。

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。2020年から開始した本セミナーは、今年度5回を合わせ、計27回開催をし、延400名以上の方々にご参加いただきました。なお、本セミナーは、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」(ZE2022D-01)と合同で実施し、またエネルギー科学研究科国際先端エネルギー科学研究教育センターの後援・協力を頂いています。

第 23 回 2022 年 6 月 13 日

「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

佐々木 明 専門業務員
(QST 量子ビーム科学部門 関西光科学研究所)



半導体リソグラフィ技術の進歩により、電子回路の微細化が進み、コンピュータの性能が向上することで、産業、社会に変革がもたらされている。Web 2.0 と呼ばれるインターネットの進歩は、日常生活、仕事のために情報収集、交換するプロセスを根本的に変革しつつある。近未来、自動運転が人の行動を変革すると言われている。直近のウクライナ戦争では、軍事技術の変革が戦争の展開に大きな影響を与えているとされている。次世代用極端紫外 (EUV) 光源は、電子回路の微細化に中心的な役割を果たす技術のひとつとして、20年以上研究開発が続けられてきた。プラズマ物理の研究によって、レーザー生成プラズマ光源の技術的な可能性が明らかになり、出力と信頼性の向上により量産技術として確立された。プラズマ分光、原子過程の基礎研究は、スズプラズマの発光メカニズムの正確な理解のもとにプラズマ条件を最適化する大きな役割を果たした。EUV リソグラフィ研究は、光源開発にとどまらず、総合技術として材料 (フォトリソグ) 等、光学 (ミラー等) の技術にも広くつながっていて、プラズマ研究に新しい課題を提供している。

- [1] “次世代半導体リソグラフィの実用化に至る EUV 光源のプラズマ研究開発の歩み”, 佐々木明, J. Plasma Fusion Res. 96, 283 (2020).

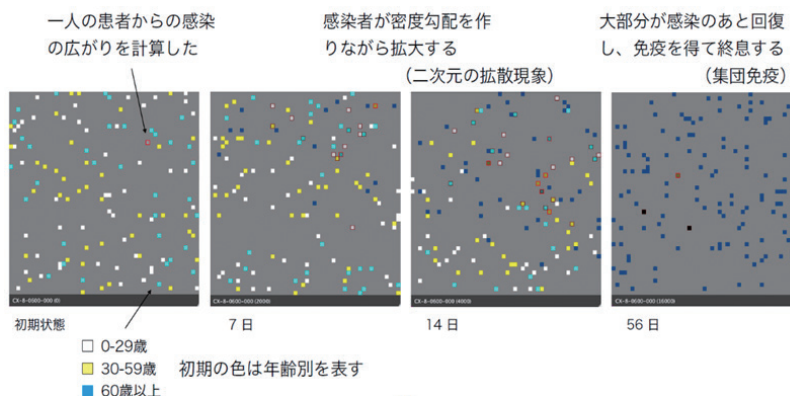


図: レート方程式を用いた「人の接触」とそれによる新型コロナウイルス感染の拡散・終息現象を模擬するモンテカルロシミュレーション結果

Comment

近年の半導体性能の向上により、新しい機器・ソフトウェア開発が飛躍的に進展している。最近では、EUV（波長域：13.5 nm）を用いたリソグラフィ技術が発達し、10 nm オーダの微細構造を有する基板の設計が可能となっている。このとき、金属（Sn）を含む新型のレジストを使用することで、リソグラフィにおける光子の吸収率が大きくなり、光子数が少ないEUVの露光時の感度が高くなる。EUVエネルギー帯においては、露光時に生成した二次電子による原子分子過程がレジストの構造形成に重要な役割を果たすことが示されている。講演では、レート方程式を用いて、Snプラズマの衝突輻射と原子過程モデルについて解説いただき、低密度プラズマにおいて発光効率が増大することが示された。また、高強度レーザーのプレパルスによりSnドロップレットを微粒子化することで、Snの低密度プラズマが生成可能であることが示された。本研究により、さらなる微細構造の実現とそれによる半導体性能の向上が期待される。さらに、レート方程式に基づいたプラズマの原子過程モデルを応用して、新型コロナウイルスの感染拡大現象を模擬するモンテカルロシミュレーションにより、感染の拡大・終息状況を「2次元の拡散現象」として示された（図参照）。「人の集合」をプラズマと考え、人の行動と接触をプラズマの原子過程で解析している点が大変独創的な視点であると感じた。本モデルを適用することで、ダイヤモンドプリンセス号での感染拡大状況と同様の傾向を示す結果が得られた点も興味深かった。また、講演自体がSpeech Synthesizerという自動音声に関する最新コンピュータ技術を使用して実施された。言い淀みがないことから講演時間の短縮に繋がる画期的な技術であり、ご講演で示された通り、多くの人々が抱えている問題が技術発展の原動力となることを実感した。（松井）

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

第 24 回 2022 年 7 月 5 日

「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

相羽 信行 上席研究員

(QST 量子エネルギー部門 那珂研究所)



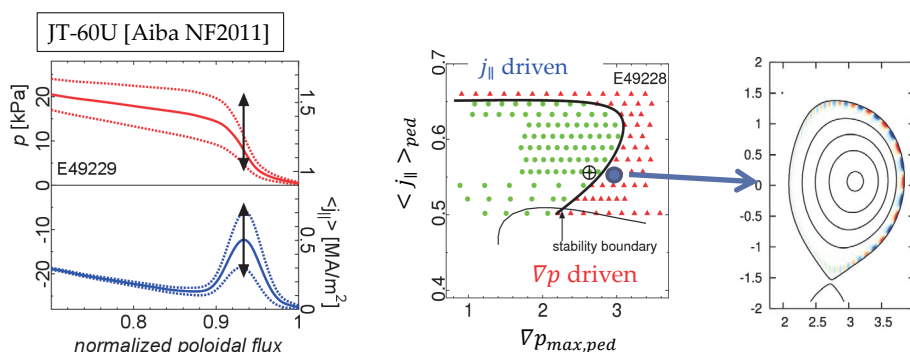
磁場閉じ込めプラズマにおいて、閉じ込め領域の境界近傍（周辺領域）でプラズマ閉じ込め性能が改善される運転モード（H-mode）が発見されてから40年が経つ^[1]。このH-modeで観測される「周辺ペデスタル領域」がプラズマ全体の閉じ込め性能向上に寄与する影響は非常に大きいため、ITERや日本で検討を進めているトカマク方式原型炉JA DEMOではH-modeを標準運転モードとして採用している^[2]。しかしながら、このH-modeでは通常Edge localized modes (ELMs) と呼ばれる不安定性が発生し、周辺ペデスタル領域で閉じ込められた熱・粒子を間欠的に放出することが知られている。ITERや原型炉ではこのELMsによって放出される熱・粒子が除熱装置（ダイバータ）の寿命を著しく低減すると考えられており、H-modeを維持しつつELMsが発生しない、あるいはELMによる熱・粒子放出量が少ない運転モードを実現することは核融合炉実現に向けた最重要課題の一つとなっている。

本講演では、既存実験装置において検討が進められているELMの影響を低減した運転モードおよび低減するための外部制御方法に関する現状での理解、および核融合炉においてそれらを採用するにあたって解決すべき課題について紹介する。これらの運転モードや制御方法は多岐に渡るため講演では概要に触れるに留まらざるを得ないが、興味を持たれたものについて気軽に質問・議論をする機会に出来れば幸甚である。

[1] F. Wagner et al., Phys. Rev. Lett. 49, 1408 (1982).

[2] ITER Research Plan (2018), K. Tobita et al., Fusion Eng. Des. 136, 1024 (2018).

PBM was identified as the type-I ELM trigger



PBM has been identified as the trigger of type-I ELM through quantitative analyses in tokamaks in the world [Snyder PoP2002 etc.].

As mentioned previously, type-I ELM should be suppressed.

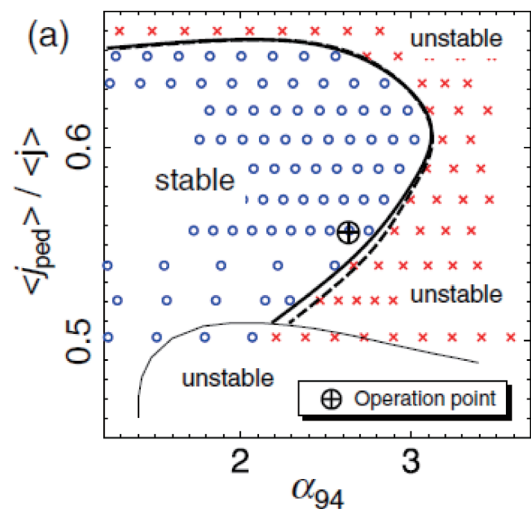
=> In other words, pedestal should be kept stable to PBM.

ITERの標準運転モードとして採用されている高閉じ込めモード（H-mode）の発見当時から周辺局在モード（Edge localized mode, ELM）はプラズマ表面における急峻な圧力勾配によって生じる不安定性として観測されている。本セミナーの導入部では、ELMの制御がトカマク周辺プラズマ物理研究で最重要課題であり、トカマク方式原型炉の設計においていかに大切であるかを、実験観測結果の紹介を交えながら説明された。そして、本篇では、ELMの理論・シミュレーション及びELM制御についての解説がなされた。

導入の後、電磁流体（MHD）エネルギー原理などを用いて、ELMの理論が丁寧に説明された。ELMはプラズマ表面近傍で発生する電磁流体不安定性であり、プラズマ表面近傍における高圧力勾配および高電流密度が駆動するバルーニングモード（圧力駆動型MHD不安定性）とピーリングモード（電流駆動型MHD不安定性）が混合した不安定性、ピーリングバルーニングモード、であると理解されている。この電磁流体不安定性の発生閾値は、通常、圧力勾配 a を横軸、電流密度 $J_{||}$ を縦軸とした $J_{||}-a$ ダイアグラムを用いて表される。プラズマ表面近傍における高電流密度は磁気シアを小さくするので、このダイアグラムはバルーニングモードの発生閾値に対する $s-a$ ダイアグラムの上下を逆さまにしたような形になる。この違いにより、 $s-a$ ダイアグラムではバルーニングモードの不安定領域が右上に現れるが、 $J_{||}-a$ ダイアグラムでは、右下に対応したトロイダル波数 $n \rightarrow \infty$ のバルーニングモード限界が現れる。 $s-a$ と $J_{||}-a$ ダイアグラムの大きな違いは、 $s-a$ では $n \rightarrow \infty$ のバルーニング不安定性が表示されるが、 $J_{||}-a$ ダイアグラムでは n が有限の不安定性も加えられている点である。なぜなら、これら n 有限不安定性がELM発生閾値に重要であるからである。そして、 $J_{||}-a$ ダイアグラムの右側で、ELMの発生限界（圧力勾配の上限値）は n が有限値のバルーニングモードによって規定され、 n が小さくなるとともに右下から右上に移動する。そして、ダイアグラムの右上角において不安定性は $n < 10$ のピーリングバルーニングモードとなる。ELM発生限界の上辺（ $J_{||}$ の上限値）は、 n が1に近く外部キंकモード的なピーリング不安定性で規定される。このダイアグラムに基づき、ELMの発生及び減衰のサイクルが説明される。

さらに、ELM制御の方法として、アクティブ制御とパッシブ制御が紹介された。アクティブ制御は、共鳴磁場摂動の印加（RMP）、ペレット入射などである。RMPは、プラズマ外部からプラズマ表面付近の磁場に共鳴する磁場摂動を加えて磁気面を破壊し、プラズマ表面付近の圧力勾配をELM発生閾値より低くすることにより、ELM発生を制御する方法である。一方、パッシブ制御は、プラズマパラメータなどの制御により、ELMがない（QH-mode）あるいは振幅が小さいELM（Grassy-ELM）を伴うH-modeの形成を目指すものである。そして、これらの方法のトカマク方式原型炉への適用性について説明がなされた。

最後に、ELM制御を中心とした周辺プラズマ物理研究において、ELM発生を抑えながらH-modeの周辺領域における急峻な分布を形成する手法には実験結果から半経験的に導かれた方法が採用されているのが現状であること、そして、周辺領域における分布形成及びELM制御という高度に非線形な現象に対して大域的ジャイロ運動論シミュレーションによる理論的物理機構の理解が期待されることが述べられた。（石澤）



N. Aiba, Nucl. Fusion (2011)

第 25 回 2022 年 7 月 5 日

「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

伊藤 篤史 准教授

(核融合科学研究所 基礎物理シミュレーション研究系)



固体・液体・気体に続く物質の四態目としてプラズマは例えられるが、その両極にある状態が接触する界面現象をプラズマ-物質相互作用と呼ぶ。プラズマは一般的に1万度以上の温度とされるが、それと接触する固体は融けることなく健全である。プラズマの密度が気体よりもさらに1万倍から100万倍も低いのである。つまり、かなり高エネルギーのプラズマ粒子が、非常に低い頻度で固体表面に飛来している。

これを原子の視点に立って眺めてみよう。プラズマ装置における典型的な入射頻度（フラックス）は核融合においても産業応用においても 10^{20} - 10^{22} $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 程度である。典型的なナノスケール表面として100 nm^2 の領域を考えると、そこにプラズマ粒子が飛来する時間間隔は1-100 μs である。これは基本的な原子の時間スケール（振動周期や化学反応）と比べるとかなり長い。拡散現象などの熱統計力学的な効果による原子の応答が十分に間に合う。これにより、単に融けるとか割れるといったマクロな概念では説明できないナノスケールの構造物が現れるのだと理解できる。このような系の例としてヘリウムプラズマ誘起ファズ構造を取り上げ、分子動力学、二体衝突近似、動的モンテカルロを使ったシミュレーションを検討すると共に、問題点を議論したい。

[1] プラズマシミュレーション 多階層複雑現象の解明へ、プラズマ・核融合学会編, 2018, pp378-390.

プラズマ-物質相互作用におけるプラズマの役割

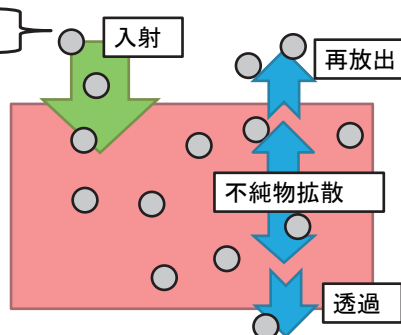
表面現象におけるプラズマの効果:

- 高エネルギー入射による原子の弾き出し
- イオン・ラジカルの荷電効果
- 原子を高濃度に注入／堆積できる(過飽和による加工の可能性)

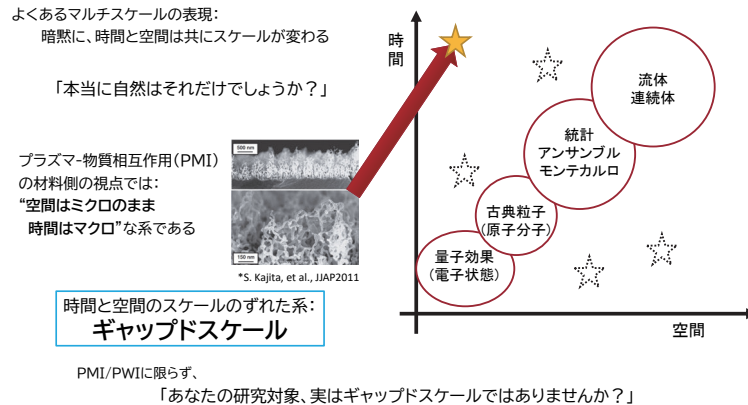
典型的な入射頻度(フラックス)は核融合においても産業応用においても 10^{20} - 10^{22} $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 程度。
典型的なナノスケール表面として100 nm^2 の領域を考えると、そこにプラズマ粒子が飛来する時間間隔は1-100 μs 。

入射頻度(フラックス)と内部過程発生頻度の競争が重要

MDでは入射頻度は自由に変えられる



MDでは粒子拡散・熱拡散を加速することは一般的にできない



Comment

伊藤篤史先生による本セミナーでは、同じ核融合プラズマでも、散逸の微小なコア領域の高温プラズマと質的に異なった温度の低い周辺領域のプラズマと固体が複雑な原子・分子過程を通して形成される接触（界面）領域のダイナミクスを原子レベルのミクロな視点から解き明かしていただきました。核分裂炉と核融合炉の違いの一つは、比表面積（表面/体積）に起因する熱流束の大きさにあり、前者の 1 MW/m^2 領域に対して、後者は 10 MW/m^2 領域になり、msec オーダで起きる ELM やディスラプション発生時にはこれを大きく上回る熱流束が固体表面を直撃します。太陽表面で放射熱流束が 60 MW/m^2 程度とされていることから、太陽と同レベルの“極限状態”として理解していました。

その過程で物質表面に多種・多様な nm レベルの微細構造が形成されると共に、He 照射したタングステン表面には“Fuzz”と呼ばれるフワフワとした綿毛構造を伴った円柱上の突起構造が形成されるとともに、その過程を分子動力学法や動的モンテカルロ法を組み合わせた 10 桁を上回る時定数をカバーしたシミュレーションによって再現するという驚きの事例を紹介いただきました。そのとき、当コメント者は大きな違和感を受けました。PWI（プラズマ壁相互作用）研究は物質の損耗や脆化といった物質が本来持っている周期性や対称性を“壊す”、もしくは、それを“防ぐ”研究と思っていたからです。伊藤先生はこの疑問に「何が理解に足りないのか、それは長時間効果 …」とのヒントを下さり、議論が白熱しました。“極限”と思われる大きな熱流束も、（１）十分に多くの原子が存在する 100 nm 四方の面積（ 10^{-14} m^2 ）で観れば、 100 psec に一個の粒子が入射する“程度”であること、（２）電子運動や原子・分子振動の時定数が f （ 10^{-15} sec ）から p （ 10^{-12} sec ）であることから、このイベントの影響は次の粒子が降り注ぐまでには緩和し、１回１回は独立していると考えられること、しかし、（３）それは完全に独立ではなく、 $psec$ から数 10 sec に至る 12 桁を上回る時定数で微細な構造が緩やかに形成されるなどの説明をいただきました。

この話を聞いて、本コメント者は、Fuzz 構造は鍾乳洞で見られる複雑な多様な構造を現出する石筍群に似ていると思いました。石塔は溶けた石灰岩の一滴一滴のしずく（雫）が数百万年をかけて緩やかに形成されるそうですが、雫の間隔を 100 sec とすれば 12 桁程度となり、背景に普遍的・一般的な原理の存在を窺がわせました。また、地球形成の初期には、多くの隕石が地上に降り注いだと言われています。固体表面を地球表面や薄い大気と考えれば、この過程が地球にどのような構造をもたらしたかも興味のあるところですが。また、入射粒子が太陽からの輻射（光子）と考えれば、地球の豊かで豊富な自然環境の形成にも関係しているかも知れません。

このセミナーを通して、PWI は、原子レベルからの新物質の形成や新機能の創出に直結する研究であり、“壊すこと”と“創ること”が表裏一体であることが強く認識されました。また、極限現象とは、撃力の大きさに目が向きますが、個々のイベントの緩和時間を越えた“緩やかな連携”を通して構造を形成するマルチスケールの問題であるとの認識を強く持ちました。“緩やかな連携とは何か”、10 桁を相手にした複雑性科学の本質に関わる課題と言えます。伊藤氏の議論を中心に据えたセミナーを通して、プラズマ・物質相互作用研究の多様で魅力的な学術性が強く認識されました。（岸本）

第 26 回 2022 年 10 月 18 日

「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

坂本 宜照 グループリーダー
(QST 量子エネルギー部門 六ヶ所研究所)



核融合実験炉ITERの建設が着実に進展し、ファーストプラズマが2025年に予定されている。ITERにおいて核燃焼プラズマの長時間維持を実証した後、核融合エネルギーによる発電を実証する核融合原型炉段階に移行する。我が国では、文部科学省の核融合科学技術委員会が原型炉研究開発ロードマップを策定するとともに、産学官が連携する原型炉設計合同特別チームがQST六ヶ所研究所に設置されITER建設と並行して核融合原型炉の概念設計の基本設計が実施された。核融合科学技術委員会による2021年の第1回中間チェックアンドレビュー後、核融合原型炉の概念設計活動が開始されている。さらに、本年9月には国家核融合戦略を策定する有識者会議が内閣府に設置された。セミナーでは、これまでに検討された核融合原型炉の基本概念について、概念設計の現状とプラズマ物理を含む原型炉パラメータ設定の根拠や制約条件について報告する。

[1] 核融合科学技術委員会の報告書：

https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/074/index.htm

[2] 原型炉設計合同特別チーム HP：<https://www.fusion.qst.go.jp/rokkasyo/ddjst/>



原型炉「概念設計の基本設計」の概要

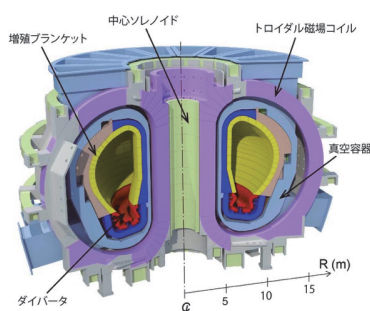
1

検討の方針

- 主要機器であるトロイダル磁場コイル、増殖ブランケット、ダイバータについては、ITER技術基盤の延長に概念を構築
- ITERにない技術については、産業界の発電プラント技術及び運転経験並びに大学等による未踏技術の解決策を取り入れた概念を構築
- 炉心プラズマについては、ITER及びJT-60SAの想定成果に基づいた概念を構築

→ 原型炉の目標（①数十万kWの電気出力、②実用に供し得る稼働率、③燃料の自己充足性）に見通しを得る基本概念を構築

基本パラメータ



主半径：8.5m
小半径：2.42m
核融合出力：1.5GW
発電端出力：0.64GW
中心トロイダル磁場：6T
プラズマ電流：12.3MA
加熱入力：< 100MW
規格化ベータ値：3.4
規格化密度： $n_e/n_{GW}=1.2$
閉じ込め改善度：1.3
冷却水：PWR条件
稼働率：～70%
運転方式：定常運転
三重水素増殖率：1.05

概念の特徴

- 誘導電流駆動による I_p 立ち上げ： $R_p=8.5m$
- ダイバータ熱負荷低減： $P_{fus}=1.5GW$
- 運転柔軟性：定常運転&パルス運転
 - ✓ 高密度・非接触プラズマとの整合性の観点から、定格の I_p でパルス運転
→十分なCS磁束を確保
 - ✓ プラズマ性能要求（ベータ値、閉じ込め改善度）を緩和したパルス運転
→初期の調整運転
→早期の発電実証



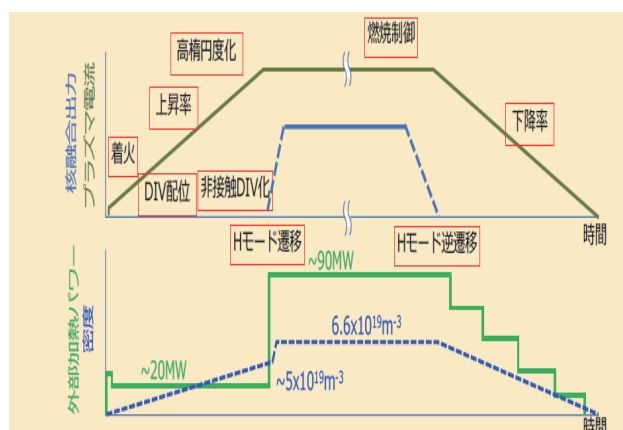
原型炉物理検討の重要課題(1/4)

運転シナリオの構築

物理設計、システム設計（炉構造、電源、計装制御仕様）への設計要求

● 物理検討のポイント（統合コードシミュレーション）

- ✓ プラズマ着火（周回電圧、ECサポート、誤差磁場）
- ✓ Ip ramp-up（電流分布、EC加熱、CS磁束消費、密度波形、ロックモード）
- ✓ プラズマ形状（ダイバータ移行、楕円度の立ち上げ）
- ✓ 非接触ダイバータへの移行
- ✓ Hモード遷移（タイミング、ターゲット密度、要求パワー）
- ✓ コアプラズマのモデリング（密度・温度・回転分布、不純物、コア放射損失量）
- ✓ 燃焼制御（ペレット、DT比、定常解）
- ✓ 燃焼立ち下げ（Ip ramp-down、不純物輸送、H-L遷移）



Comment

本セミナーでは日本の原型炉（JA DEMO）の設計研究を中心的に進めている QST の坂本宜照グループリーダーに計画の全容と現状に関する報告を行っていただきました。ITER の完成を間近に控えて原型炉に対する期待は高まり、文部科学省核融合科学技術委員会においても計画を「一層早める（前倒し）」などの検討もなされています。一方、原型炉設計の全体像を把握することは容易ではなく、今回はその貴重な機会となり、2 時間半に渡って活発な意見交換がなされました。

原型炉設計で気になるのが、核分裂炉では小型に相当する約 1.5 GW（発電端出力 0.64 GW）の核融合出力に対して、現時点では主半径が 8.5 m の設計（ITER は 6.2 m）になっている点です。JT-60 などの研究から、トラス系装置では輸送障壁を含む様々な閉じ込め改善現象が発見されていますが、これらの成果は装置の小型化につながると考えていただけに“大きい”との印象がありました。坂本氏には、先進運転を積極的に取り入れた小型の設計もオプションとして選択し、現状の設計と二つを平行して進めてはどうか…など、話していた経緯がありました。しかし、欧州の EU DEMO は、JA DEMO より大きい 2.0 GW（パルス運転）の出力を想定していますが、主半径は 9.1 m も大きく、閉じ込め改善因子（HH 因子 ~1.0）や規格化ベータ値（ $\beta_N \sim 2.5$ ）、さらに自発電流割合（ $f_{BS} \sim 0.39$ ）はいずれも JA DEMO よりも低く設定していることから、十分に挑戦されていることが分かりました。

セミナーでは、原型炉の目標と概念設計を中心 R&D 項目に説明いただいた後、パラメータ設定の根拠、特に前述の主半径が 8.5 m に至った根拠について、最大の供給フラックス Ψ_{max} 、HH 因子、自発電流割合 f_{BS} などの物理量を主半径 R_p の関数として示していただきました。その中でも、定常運転の至る過程は未知の要素を含むことから色々な運転に対応できる自由度を持たせておく必要があるとして、中心ソレノイドコイルの磁束供給量に裕度を持たせ、誘導電流駆動だけで定格のトロイダル電流（12.3 MA）までの立ち上げができることを条件にした結果（ $\Psi_{max}/\Psi_{ramp} \sim 1.5$ ）であると理解しました。その下で、装置の大型化に伴って運転密度が ITER に比べて低くダイバータの維持に不可欠なデタッチメントが成立しにくいことから、楕円度をできるだけ大きくして Greenwald 限界密度を上げるなどの努力が払われているとの説明を頂きました。装置建設における裕度の取り方に関係して、JT-60 は 1990 年前後、H モード遷移を実現することを目的に、同じトロイダルコイルを使用しながら真空容器を円形から非円形にしてプラズマの体積を大きくする改造を行い、その結果、多くの成果につながりましたが、これが実現したのは、当初の JT-60 の設計・建設において、装置に裕度を持たせて作っていた賜物であると聞いたことがあります。限られた予算の中で、どこに、どのような裕度を持たせて装置を設計・建設するかはプロジェクトの成否を握る大きなポイントと思いました。

坂本氏は、ダイバータの熱負荷の観点から運転密度を高めることを前提に、主半径を下げて小型化するオプションの検討も紹介され、“まとめ”では、小型化を目指すべきか？ 高出力化を目指すべきか？ トロイダル磁場はどこまで頑張れるか？ との問いかけをされました。原型炉のパラメータ設定は核融合実現の将来に直接かかわることから、今後も理論やシミュレーションを含む最新の知見を取り入れて見直しをする必要があることを強調されました。（岸本）

第 27 回 2022 年 10 月 25 日

「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

栗原 研一 文部科学省技術参与（核融合研究開発担当）
（前 QST 量子エネルギー部門長）



究極のエネルギー源核融合発電は、世界中で研究開発が始まって既に70年以上が経過しました。燃料が海水中に無尽蔵、高い安全性、万年オーダーの隔離を要する放射性廃棄物は生じず、また低レベル廃棄物も減衰が早く管理が容易で、まさに究極ですが、高度なプラズマ制御や超ハイテク機器開発が必要で、しかも装置規模の大型化が必須で、課題克服に予想以上の時間がかかっています。

1950年代から世界中で繰り広げられた性能競争の結果、1990年代には欧州のJET、日本のJT-60で臨界プラズマ条件（エネルギー増倍率=1）が達成され、しかもJT-60は、イオン及び電子の達成温度で世界記録を保持していることは、あまり知られていません。

その成果は、2007年から開始された国際協力「実験炉ITER」の建設計画に繋がっており、2025年の実験開始に向け、完成度77%まで組立が進んでいます。この実験炉で、核融合出力50万kW（増倍率10）のプラズマを長時間保持出来れば、いよいよ最初に発電を行う原型炉（核融合出力150万kW（増倍率20）、60万kW発電）の建設へと進む、というシナリオが日本や主要先進国の大凡のロードマップです。

一方、エネルギー問題と強く関係する地球環境問題対策では、2019年気候変動枠組条約第25回締約国会議（COP25）を経て、異常気象頻発を背景に、脱炭素政策が国際的なうねりとなっています。中心課題のカーボンニュートラルに貢献するエネルギー源の一つとして、先進各国は核融合発電を位置づけています。米英の脱炭素政策の中で、2035-2040年代という早期の核融合発電計画が発表され、英国では建設サイトも絞られています。日本においても、岸田総理が国会本会議での施政方針演説で核融合エネルギーにも言及し、国家的なGX（Green Transformation）戦略の中で開発の加速が期待されています。

本講演では、核融合の開発小史を紹介し、特に発電に最短距離にある磁場閉じ込め方式「トカマク装置」を中心に1950年代以降の課題克服に向けた主要な活動と開発戦略を技術的な側面を交えてまずレビューします。実験炉に向けた検討がIAEAの場で開始されたのは、1970年代後半で未だ先の見通せない時期でしたが、その後の実験の進展により1990年代には、実験炉の設計活動が開始されました。そこで、プラズマ性能の進展と開発戦略とが相呼応する形で物事が進んで行く様は核融合の特徴でもありますので、2000年代のITER建設開始までの技術と戦略の相互作用を次にレビューします。直近の約20年間は、ITER後の核融合発電を行う原型炉実現までを対象として検討されてきています。世界的に新規の大型装置がない中で、技術的な検討を進めなければならないという困難な境界条件での戦略を短くレビューします。このように70年間は、未知のプラズマに対し、実験からの知見と技術開発を武器に、研究開発戦略という一定期間の計画外挿に基づく短期ミッションを適宜修正接続しながら進めてきました。この私的レビューを通じて、過去の研究開発に関する格闘の歴史を踏まえて現時点での未来展望を試みます。

[1] 山本賢三、「核融合の40年—日本が進めた巨大科学—」ERC出版（1997）

[2] ロビン・ハーマン（見角鋭二訳）、「核融合の政治史」朝日新聞社（1996）

[3] 関昌弘編、「核融合炉工学概論」日刊工業新聞社（2001）

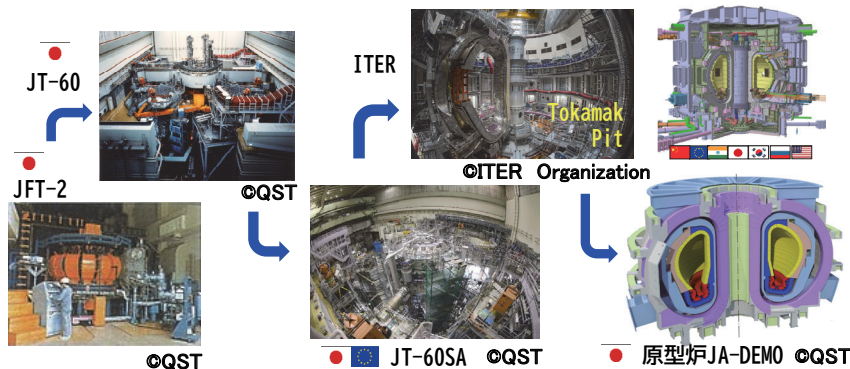
[4] ITER情報：<http://www.fusion.qst.go.jp/ITER/index.html>、ITER機構：<https://www.iter.org>

[5] 幅広いアプローチ(BA)活動情報：<https://www.qst.go.jp/site/ba>

[6] 原型炉開発戦略は、以下の文献（掲載学会のHPで情報入手可能）：

- ①坂本修一, 山田弘司,「今後の核融合原型炉開発に向けて」プラズマ・核融合学会誌, 90 (2014) 821-824.
- ②松浦重和, 小川雄一, 岡野邦彦, 上田良夫, 秋山毅志,「核融合原型炉開発に向けた新推進方策・ロードマップの策定にあたり」プラズマ・核融合学会誌, 94 (2018) 575-582.
- ③岡野邦彦, 飛田健次,「核融合原型炉開発の動向 アクションプランと核融合工学研究の進展」日本原子力学会誌, 60 (2018) 637-641.
- [7] K.Tobita, et al.,“Overview of the DEMO conceptual design activity in Japan”, Fusion Engineering & Design, 136 (2018) 1024-1031.

核融合研究開発基本計画に基づく装置開発から発電する原型炉への流れ



核融合発電への戦略的判断と研究開発 (1950年代から現在、そして未来へ)

核融合エネルギー発生装置を目指した研究開発活動では、以下の戦略的判断が、その時の様々な情報を基になされている：

- 戦略的判断1：1959年 A計画の予算措置とB計画不採用
- 戦略的判断2：1968年 第1段階基本計画採択(B計画復活)
- 戦略的判断3：1975年 第2段階基本計画採択
- 戦略的判断4：1992年 第3段階基本計画に移行
- 戦略的判断5：2002年 実験炉ITER建設移行判断

特に以上の判断には、少なくとも以下のマクロ的な研究開発課題解決が大きな影響を及ぼしていることが考えられる。

- ①ダイバータ概念創出
- ②プラズマと磁場・コイル設計
- ③プラズマ位置形状検出と制御
- ④負磁気シア運転の実証と適用

今後ITERが運転を開始した以降も、ITERのミッション達成に必要な新たな課題克服の研究開発を進め、2025年のCheck & Reviewの後、2035年の**原型炉**建設判断に必要な知見を提供出来るように戦略的に対応して行くことになるであろう。

Comment

本セミナーでは、JT-60プロジェクト（現QST：当時日本原子力研究所）に実験開始時期から携わってこれるとともに、設計研究を通して2013年から開始した超電導トカマク装置JT-60SAの建設を率いてこられた栗原研一氏（現文部科学省技術参与）に、日本および世界の核融合研究の黎明期に溯って、これまでの流れを振り返りながらレビューしていただきました。折しもグリーンイノベーションの世界的な潮流の中、2025年のITERの完成と実験開始に向けた取り組みとともに、60万kWを上回る定常な電気出力を目指した原型炉の設計が進む今日、これまでの核融合研究の流れを振り返り、次のステップの在り方や進め方を問い直すことは意義深いと思います。

太陽のエネルギーが核融合によるものであることが分かったのは1932年（コッククロフトとウォルトンによる）と意外に新しく、地上でのエネルギー源として核融合を目指した研究が公にスタートしたのは1958年の第2回ジュネーブ会議からとされています。栗原氏は、日本の核融合研究開発のマイルストーンを黎明期に溯り、第1回を1959年として、これまで5回の重要な戦略的な“判断”があったとして説明されました。ちなみに、第5回の判断は実験炉をITERとして位置付けた2002年とのことでした。

しかし、今回の講演で驚いたのは、1959年の核融合の起点をさらに10年遡り、1950年を起点に当時の状況を説明された点でした。当時、核融合研究が最も進展していたのはソビエト連邦ですが、それを知るところとなったのも前述の第2回のジュネーブ会議においてトカマク装置T-1の報告によるとの理解でした。しかし、それに先立って、1950年には磁場閉じ込めの構想が存在していたこと、1951年にはトロイダル系の核融合概念が登場するとともに、トロイダル容器でプラズマの着火を行ったこと、1954年にはTMP（troid v magnitnom pole）と呼ばれるトカマクの前身の配位が実現したことなどに言及されました。本コメント者も栗原氏とほぼ同時期に核融合研究に携わってきましたが、1958年以前の空白期間の話聞いたのは初めてでした。

当時は、Bohm拡散として参照される悪い閉じ込め状態しか得られないことから、1959年の第1回判断では、大型装置の建設は不採択となり、大学を中心に多様な閉じ込めを検証する研究を行うことになったこと、しかし、1968年（判断2）に同じくソビエト連邦のT-3Aにおいて温度が1千万度、20 msec（Bohm則の数10倍）の閉じ込め時間を実現したことを受けて中型装置の建設（JTF-1等）に踏み切ることになったこと、また、1975年（判断3）には大型トカマクであるJT-60の建設を行うことになったこと、そして1992年（判断4）には、JT-60U（非円形断面に改造を施したもの）は未だ研究途上でしたが、その時点で実験炉に向けたトカマク実験の加速・推進を謳ったこと、その後、JT-60Uは等価的臨界プラズマ条件を達成するとともに、世界的にはTFTR（米国）やJET（EU）による三大トカマクの成果を含め、閉じ込めプラズマの理解が大きく進展したこと、これらが前述の2002年（判断5）のITERにつながるの流れとなったことなどを説明いただきました。

上記は研究開発の戦略的な側面ですが、栗原氏は非線形逆問題の専門家であり、JT-60でのプラズマの位置形状の構築について、積分方程式による厳密解の導出によって実時間制御を行う方法論を開拓されました。講演では、その経緯や流れについてもお話いただき、開発研究が精緻な学術研究で支えられていたことが強く認識されました。当時JT-60は炉心監視のシステムとして、可視化とともに放電の状況を音で表現する可聴化が行われていましたが、これが栗原氏によるものであることを今になって知ることとなりました^{備考}。

栗原氏は、最後のまとめで、核融合が自然界における物理的・工学的な数々の幸運によって人類が構想することを許されたエネルギー源であることを述べられたことが印象的であり、聞き入りました。講演中も多くの質問と議論があり、2時間を上回る白熱したセミナーとなりました。

備考）“可聴化”に関して栗原氏から興味深い後日談をいただきました。可聴化システムを稼働させた1990年代半ばぐらいにJT-60では磁気プローブ信号を4 kHzでサンプルしデジタル化していました。再現出来る現象の周波数はサンプリングの半分以下ですが、生アナログ信号を直接音に変換してデジタル化すれば、20 kHzまでの情報が取り込めるというFFTの特長に当時気づかされたとのこと。観測手法として音を使うことに注目する一般向け記事を最初に目にしたのは、日経サイエンス2015年7月号p.77-80でR・コーエン「隠れたパターンを探し出すデータ可聴化」とのこと。（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 一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
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)	ヘリオー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 園興 招聘教授 (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
	藤岡 慎介 教授・副所長 (大阪大学レーザー科学研究所)	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
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

2022 年度 アクティビティカレンダー

2022

-
- 4 月 11-12日 Joint International Discussion Seminar in Plasma UNIT with Prof. Hyeon Park (UNIST)
-
- 5 月 11日 NIFS ユニット構成意見交換会
17日 ユニット特任教員・客員研究員 辞令式
-
- 6 月 13日 第23回 プラズマ科学セミナー／佐々木 明 専門業務員 (QST 関西光科学研究所)
-
- 7 月 3日 外国人共同研究者の受入開始 (Łukasz Syrocki 博士研究員)
5日 第24回 プラズマ科学セミナー／相羽 信行 専門業務員 (QST 那珂研究所)
27日 第25回 プラズマ科学セミナー／伊藤 篤史 准教授 (核融合科学研究所)
-
- 9 月 21日 プラズマ原子過程のモデル化に関する研究会
-Workshop for modeling of plasma atomic process
-
- 10 月 18日 第26回 プラズマ科学セミナー／坂本 宜照 グループリーダー (QST 六ヶ所研究所)
25日 第27回 プラズマ科学セミナー／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)
-
- 11 月 24日 第 1 回 SWIP 核融合科学センターにおける集中講義 (岸本 SWIP 客員教授)
Intensive Lectures : Structure and Dynamics of Fluctuation in magnetically confined Fusion Plasma
-
- 12 月 22日 京都大学「プラズマ科学入門」での講義：レーザー核融合プラズマについて
(岸本ユニット客員研究員)
-

2023

-
- 1 月 5日 京都大学「プラズマ科学入門」での講義：磁場核融合プラズマ研究の最前線
(QST 那珂研究所 井手部長)
12日 京都大学「プラズマ科学入門」での講義：プラズマの複雑性と多様性について
(岸本ユニット客員研究員)
-
- 3 月 1日 第 2 回 SWIP 核融合科学センターにおける集中講義 (岸本 SWIP 客員教授)
Intensive Lectures : Structure and Dynamics of Fluctuation in magnetically confined Fusion Plasma
3日 第 3 回 SWIP 核融合科学センターにおける集中講義 (岸本 SWIP 客員教授)
Intensive Lectures : Structure and Dynamics of Fluctuation in magnetically confined Fusion Plasma
14-15日 The 7th UNIST- Kyoto U. Workshop on “Physics validation and control of MHD instabilities and turbulent transport in fusion plasmas”
23日 2022年度第 1 回非線形・非平衡プラズマ科学研究ユニット運営協議会
-

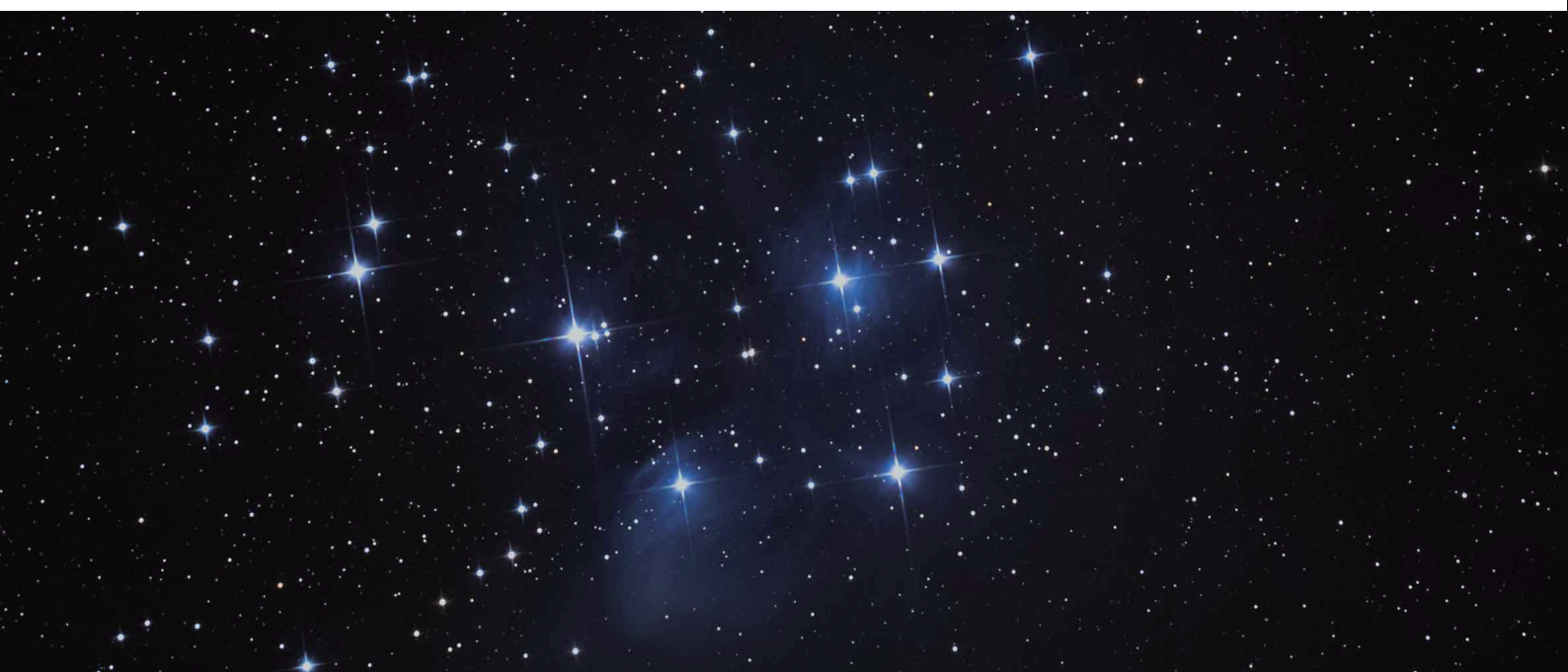
ユニットメンバー

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	量子ビーム科学部門関西光科学研究所
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	高温プラズマ物理研究系
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