

■ ITPA(国際トカマク物理活動)会合報告(81)

分野：「スクレイプオフ層とダイバータ物理」¹，
「周辺ペDESTAL物理」²

開催日：2022年1月18日～26日¹，
2022年2月14日～18日²

場所：リモート会議

担当委員：

芦川直子(核融合研)¹，上田良夫(阪大)¹，大野哲靖(名大)¹，坂本瑞樹(筑波大)¹，仲野友英(量研)¹，福本正勝(量研)¹，増崎貴(核融合研)¹，相羽信行(量研)²，浦野創(量研)²，神谷健作(量研)²，大山直幸(量研)²，鈴木康浩(広島大)²，森崎友宏(核融合研)²

(下線は当該グループの会合への出席者を示す。所属名は会合開催当時のもの。)

次回会合の予定(開催日程，開催場所)を以下に示す。

会合名	開催日程	開催場所
スクレイプオフ層とダイバータ物理	未定	未定
周辺ペDESTAL物理	2022年10月31～11月4日	カダラッシュ(フランス)

1. 「スクレイプオフ層とダイバータ物理」

第30回のトピカルグループ会合はオンラインで開催された。総講演数は41件であり，事前登録者は177名(日本12名，欧州78名，米国27名，中国25名，ロシア9名，韓国4名，インド2名，ITER機構9名)であった。以下にセッションごとの概要をまとめる。

ダイバータ機器の寿命：WESTから1件の報告があった。ITERと同様のタングステンモノブロックダイバータのリーディングエッジ部に発生した亀裂の発生機構を，有限要素法計算で明らかにしたことが報告された。

電子サイクロトロン波による放電洗浄(ECWC)：ITER機構からECWCの計画が報告された。ECを数百ミリ秒間入射してプラズマを生成し，壁から放出されたガスを100-200秒間排気する，という放電を繰り返す案が示された。ASDEX-UとTCVから磁力線の影響が報告された。磁力線が接続している壁へのイオン入射量が多いため，この領域からのガス放出が多い可能性が示された。

中性粒子のダイナミクス：荷電交換(CX)中性粒子の照射がITERの第一壁に及ぼす影響を評価するため，新たな共同研究の枠組み(DSOL)として“Charge exchange neutral induced first wall erosion”が提案された。CX粒子の発生メカニズム及び第一壁上での空間分布，第一壁損耗量の評価及びこれらのモデルによるベンチマークを計画しており，EAST，ASDEX-Uなどから第一壁の損耗量やモデルの三次元化などに関する結果が報告された。

金属壁でのヘリウム運転：JETから今夏に予定しているヘリウムプラズマ実験期間に実施する実験の提案内容が紹介された。WESTからヘリウムプラズマ実験後のタングステン被覆グラファイトダイバータ板の分析結果が報告された。ミラノ工科大学から同大学の直線型プラズ

マ装置GyMで開始されつつある，SOLPS-ITERとERO2.0コードを用いたヘリウムプラズマ照射による材料損耗と輸送のシミュレーションについて報告された。

デタッチメントと第二スクレイプオフ層(Far-SOL)形成の関係：TCVから高磁場側SOLと壁のギャップを大きくすると「肩」が発生しないことが報告された。DIII-DからSASダイバータ配位では「肩」が観測されないことが報告された。EASTから下側ダイバータ実験では比較的的低密度でも「肩」が発生したことが報告された。

MDC-DSOLの協力：逃走電子による第一壁への熱負荷についてITPA装置間比較実験を立ち上げるための議論を行った。この装置間比較実験では逃走電子ビームによる第一壁の損傷を防ぐために逃走電子ビームを第一壁に到達する前に散逸させることが目的である。そのため，逃走電子ビームを消滅させるためのガス種をシミュレーションと実験の比較により決定する計画である。

三次元磁場構造のダイバータへの影響とプラズマ壁相互作用：ウィスコンシン大学からITERにおける最適共鳴誤差磁場印加(RMP)コイルの位相とダイバータ板での磁力線パターンが報告された。EASTからトロイダルモード数 $n=3$ よりも $n=4$ の方がエネルギーと粒子の閉じ込めが良いと報告された。KSTARからRMP印加時に窒素ガスパフすることでダイバータへの熱流束が低減することが報告された。

Nuclear Fusion誌：ITPAの全8トピカルグループの過去10-15年の成果をまとめるようにとのITPA調整委員会よりの指示を受け，執筆が進められている。DivSOLトピカルグループが担当する第七章は導入とまとめを含めて全10節から構成され，SOL/ダイバータにおけるプラズマの輸送，パワーの散逸，ELM特性，ELM緩和，プラズマ対向壁の損耗，水素インヴェントリー，プラズマ対向壁の損傷及び熔融などが記述される。最初のドラフトを4月中旬に完成させて，2022年中の提出を予定している。

ELM熱負荷及び小振幅ELMに関するPEPトピカルグループとの協力：ペDESTALトピカルグループと共同で小振幅ELMについてのITPA装置間比較実験を立ち上げるための議論を行った。小振幅ELMでのSOL熱流束幅のデータベース化などで貢献が期待される。COMPASSからType-I ELM間のSOL熱流束幅はEichスケーリングの約半分の幅であったことが報告された。DIII-Dからペレットで誘発されたELMによるダイバータ板上での熱流束分布は，自発的に発生したELMに比べて，内側ダイバータ板で半減し，外側ダイバータ板で増加したことが報告された。同じく，DIII-DからELM間には第二ダイバータへは熱流束は到達しないが，ELM時には第一ダイバータ時の数分の一の熱流束が到達することが示された。

デタッチメントの物理と制御：ITER機構からITERのデタッチメント制御に使用できる計測器が報告された。ITERではデタッチメントの制御手法を開発する猶予がないため，現在の装置での確立が重要との指摘であった。DIII-Dからデタッチメントの程度を示す指標の評価に新たな手法を導入したことが報告された。本手法により，KSTARでのデタッチメント制御に関する初期結果が報告

された。EASTよりプラズマからの放射損失量とダイバータの電子温度をそれぞれネオンとアルゴンのフィードバックパラメータとして同時に用いる手法が報告された。DIFFERとORNLからは、不純物入射に対するプラズマの応答を予測することがデタッチメント制御に重要であることが指摘された。JETから高パワー加熱時(〜30 MW)にネオン、窒素導入によるダイバータ熱負荷軽減とコア閉じ込め性能の改善についての実験結果が報告された。P.C. Stangebyから、SOLPS-ITERのシミュレーション結果を解析したところ、ダイバータの電子温度とネオンのパフ量がSOLのプラズマを特徴づける最も重要なパラメータである可能性が示された。

ITERの建設状況：ITER機構からサイトの建設状況とトカマクの組立状況が報告された。一部の建屋は完成し、所有権がITER機構に移転された。トカマクピット内ヘクライオスタットベースなどを設置し、真空容器セクターヘトロイダルコイルなどを組み込み、最初の真空容器セクターをトカマクピットに設置する準備が整った。ITER Research Plan (IRP)の完成に必要なR&Dも紹介された。

2. 「周辺ペDESTAL物理」

第39回となる本会合では、ITERの最重要課題であるELMの物理と制御、HモードペDESTAL構造の理解、国際装置間比較実験などの現状報告に関して討議が行われた。

同位体効果に関するセッションでは、複数装置間での比較実験及びモデリングの進展が報告され、IRPで示された最優先解決課題への貢献について議論された。JET-ILWでのペDESTAL構造及びELM特性について粒子バランスの観点からメインチャンバーからの寄与について2次元流体コード及びモンテカルロ計算の結果が報告された。また、DIII-DからL-H遷移に必要な加熱パワーについて、安全係数や新古典トルク、同位体効果などが系統的に調べられ、ITERのプラズマ電流立ち上げ時における影響などが議論された。

RMPに関するセッションでは、ASDEX-UとDIII-Dを用いた軽水素プラズマにおけるRMPによるELM制御の有効性検証の進捗について報告があった。現時点ではいずれの装置においてもELM抑制はできていないが、それぞれの装置でH-L逆遷移やRMPによる密度放出について傾向に違いがあり、特にASDEX-UではELM抑制が期待できる条件にあるにもかかわらず実際にはできていないとのことで、その原因を解明するための実験予定が示された。RMPによるELM制御に関するワーキンググループ活動の報告では、最近のRMP実験及びシミュレーション結果の紹介がされたとともに、IRPで示された最優先解決課題の解決に向けた活動について現状報告があった。EASTからは、トロイダルモード数 $n=4$ のRMPを下側ヌル点配位のプラズマに印加した際にも、比較的幅広い安全係数窓($4 \leq q_{95} \leq 4.7$)の範囲でELM抑制が達成できたことが示された。

ペDESTAL構造と輸送の物理に関しては、MAST-Uと

TCVから新しい実験結果が報告された。MAST-Uは最近の実験で、ペDESTALがpeelingモード境界に存在することが明らかになり、今後PEP-43の課題に取り組むこととなった。またDIII-Dで得られたQHモードをいかにしてITERを含む他装置に拡張するか、ITERの実験開始を見据えヘリウム放電に関するデータベースの構築をどのように進めて行くかについて議論された。

Iモードの物理とL-Hワーキンググループからは、JETにおけるDT実験の初期結果が報告され、L-H遷移の閾値パワーは、Tの方がDよりも低いことが示された。EASTからはIモードに関する報告があり、Iモード中に観測されるダイバータデタッチメントや、ペDESTALバースト不安定性の実験結果が示された。また、L-HワーキンググループがIRPに挙げられた課題に対して取り組むべき項目について議論がなされた。ITERの軽水素実験期におけるHモードの実現に関しては、DIII-DやJETにおける低い電子-イオン相関のプラズマの活用が、磁場の3次元効果とHモード実現との関係に関しては、DIII-D、KSTARにおけるRMP実験、HL-2Aにおけるジャイロ運動論モデルによる理論計算の活用が議論された。

小振幅ELMのセッションでは、ダイバータ/SOLトピカルグループとの合同で進める国際装置間比較実験の発足について報告があった。ASDEX-Uでは、quasi-continuous exhaust (QCE)と呼ばれる、高三角度かつダブルヌルに近い配位で主プラズマ領域へのガスパフによる高い粒子供給で小振幅ELMが出現した。QCEでは、熱流束によるSOL幅がtype-I ELMに比べて4倍近くまで広がる一方で、ペDESTAL圧力や閉じ込め時間への影響は小さいことが示された。このQCEはDIII-D、EAST、TCVで確認されており、今後、小振幅ELMのフィラメントやSOL幅の大型装置への外挿性を調査する予定である。

Pedestal Fuelingセッションでは、ペDESTAL部の密度分布に強い非対称性が表れる原因が議論された。DIII-D実験では強磁場側と弱磁場側で同時にLyman- α 線の計測を行うことができ、SOL部でのE×Bドリフトが密度分布の非対称性を生む原因とする報告がなされた。また、SOLの中性粒子密度が、ペDESTAL部の密度分布に大きく影響を及ぼすことがモデリングから予想されるとの報告があった。Impurity Seedingセッションでは、不純物パフを周辺部に入射した際のイオン温度の上昇について報告があった。HL-2Aでは、SMBIによりNeを入射すると、ELMの周波数が高くなり、ペDESTAL部のイオン温度上昇が観測された。このとき、電子温度はほとんど変わらず、電子輸送とイオン輸送がdecouplingしていることが示唆される。

本会合では最後に、周辺ペDESTAL TGにおける2007年以降の成果をNuclear Fusion誌にまとめるにあたっての執筆予定について議論が行われ、それに際して執筆するトピックの洗い出しが行われた。L-H遷移が輸送・閉じ込めTGに割り当てられているが、周辺ペDESTAL TGの内容であるとの指摘があり、両TG間で調整することになった。本年11月開催との次回会合をターゲットとした執筆スケジュールを組み立てることが確認された。

(原稿受付日：2022年4月1日)