

■ ITPA(国際トカマク物理活動)会合報告(73)

分野: 「計測」¹, 「スクレイプオフ層とダイバータ物理」²

開催日: 2019年10月7日～10月10日¹,
2020年1月13日～1月16日²

場所: ITER機構(フランス)¹, 済州(韓国)²

担当委員:

秋山毅志(GA)¹, 石川正男(量研)¹, 磯部光孝(核融合研)¹,
ピーターソン・バイロン(核融合研)¹, 江尻晶(東大)¹, 谷塚英一(量研)¹, 佐野竜一(量研)¹, 朝倉伸幸(量研)²,
芦川直子(核融合研)², 上田良夫(阪大)², 大野哲靖(名大)²,
坂本瑞樹(筑波大)², 仲野友英(量研)², 増崎貴(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)

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
計測	2020年10月19日～22日	ITER機構(フランス)
スクレイプオフ層とダイバータ物理	2020年10月19日～22日	ITER機構(フランス)

1. 「計測」

第37回計測トピカルグループ(TG)会合がフランスのITER機構にて開催された。本会合には、約75名が参加した(内訳(含遠隔参加): 日本3名, 韓国5名, 米国2名, EU22名, ロシア9名, 中国12名, インド2名, ITER機構18名)。主な内容を以下に記す。

1.1 ITERの計測における最重要課題への取組み状況

計測TGの最重要課題のうち精力的な取組みが進められているのが、「プラズマ対向第一ミラーの寿命の最適化」に向けた取組みである。ITERでは、プラズマ対向壁材料(ベリリウム, タングステン等)の金属微粒子が光学計測用プラズマ対向第一ミラーに堆積して運転期間中に反射率が劣化することが懸念されており、計測用金属ミラー周辺にガスを封入し、ミラーを電極として容量結合プラズマを生成することによるミラークリーニング機構の開発が世界的に進められている。ロシアのヨッフェ研究所からは、ミラークリーニング用の高周波プラズマのパワーを変調することで、主な堆積物であるベリリウムのスパッタ率を30%程度、酸化ベリリウムのスパッタ率を1桁以上高くすることができたとの報告があった。また、先行研究として、ミラークリーニングシステムを搭載したプラズマ対向第一ミラーユニットのモックアップを用いた試験が実施されるなど、精力的な取組みが報告された。この他、EAST やスイスのバーゼル大学からもミラークリーニングに関する研究成果の報告が行われた。

1.2 ITPA/IEA 共同実験に関する議論

以下に示す共同実験の実施状況について議論した。

ガンマ線制動放射分光による逃走電子のエネルギー分布計測に対する共同実験では、ASDEX-Upgrade(ドイツ)及びJET(イギリス)における実験キャンペーンにおい

て逃走電子のエネルギー分布を評価するためのデータが順調に蓄積されていることに加え、新たなガンマ線検出器がEAST(中国)で利用されることにより、2020年からはASDEX-Upgrade/JET/EASTを利用した詳細なデータ分析を実施できる見通しとなった。壁反射光モデルのベンチマーク試験では、ASDEX-UpgradeとWEST(フランス)によるプラズマ実験とともに、実験室での補助実験を組合せて試験を進めている。本会合では、WESTにおける実験結果が報告され、3次元温度分布を計算するための熱モデルの開発により、計算時間を短縮しつつ、広領域の計算が可能となった成果が報告された。

1.3 各極の活動状況

会合初日にEU及びITER機構のプログレス会合が開催され、EUからは磁気計測、中性子カメラ、協同トムソン散乱計測、ボロメーターによる放射計測、荷電交換再結合分光計測、マイクロ波反射計、可視赤外広角カメラ、ポート統合機器などの装置に関する報告があり、ITER機構からはミラークリーニング、ロゴスキーコイル、ダストモニタシステム、熔融石英真空窓などの設計の進捗の他、中性子計測装置のその場校正試験の計画の報告など、幅広い分野からの報告が行われた。多くの装置で構成機器のプロトタイプを用いたITERでの使用環境を想定した試験が進められており、実機製作に向けた精力的な活動が確認できた。アメリカからは、マイクロ反射計について、性能評価を実施するためのプロトタイプを用いた試験の進捗とともに、DIII-Dを用いたその場校正手法確立に向けた取組みが報告された。また、ITERで課題となっているプラズマに吸収されなかった加熱用ECH用マイクロ波を計測するセンサーの開発がDIII-Dで進められている。ロシアでは数多くの装置がプロトタイプやモックアップを製作しながら各計測装置の設計を進展させている。ダイバータ中性子束モニタにおいては、信号処理システムのプロトタイプを用いた検出器の中性子照射試験が実施されており、中性粒子計測システムにおいては、モックアップを用いた性能試験が進められている。韓国からは、中性子放射化箔において実機製作に向けた統合試験や真空紫外スペクトロメータにおけるプラズマ対向第一ミラーの製作設計に関する報告が行われ、実機製作に向けた進展が確認された。中国からは、X線カメラやダイバータラングミュアプローブの開発において、計測器の開発だけでなく、プリアンプや中間アンプなどの信号処理システムの開発も順調に進められている様子が伺えた。また、中性子束モニタの構成正機器であるサポートフレームの実機製作に向けた準備状況が報告された。インドからは、電子サイクロトロン放射計測について伝送ラインによる信号の減衰を低減するための試験結果の報告があった。

1.4 日本からの報告

石川氏(量研)からは、日本が調達するITER計測装置の開発の進捗について以下の報告があった。マイクロフィッションチャンバーでは、ITERの安全重要機器である真空導入端子の構成機器に対する中性子照射試験が実施された。ポロイダル偏光計では、ブランケットモジュールに設置するレトロリフレクターの製作性が実証

された。周辺トムソン散乱計測装置では、ガンマ線照射による光学ミラー及び真空窓に対するレーザー誘起損傷への影響の評価が進められている。ダイバータ赤外サーモグラフィーでは、温度依存性のない高精度な計測を実現するための熱流速再結合コードの開発が進捗した。また、ピーターソン氏（核融合研）からは、赤外イメージングビデオボロメーターと抵抗性ボロメーターの相互比較のために、LHD, Alcator C-Mod（アメリカ）、MAST-U（イギリス）等の装置を利用した共同実験の提案が行われた。

2. 「スクレイプオフ層とダイバータ物理」

第28回目となる本会合は韓国・済州島のサンシャインホテルで開催された。参加者は62名（日本から4名）で、総講演数は37件（同3件）であった。国際装置間比較実験の進展報告に加えて、ITERリサーチプランR&D項目の解決に向けて、新たに立ち上げられた国際装置間比較実験（非接触状態ダイバータプラズマの制御、ITERダイバータの寿命の決定）の初回報告が行われた。以下ではセッションごとの概要をまとめる。

非接触ダイバータプラズマの物理と制御・不純物入射：スイスのTCVでは、新たにバッフル板を設置してダイバータ室の中性粒子圧力を上昇させる実験を開始した。バッフル板設置後では、設置前と比較して低温・高密度のダイバータプラズマが形成され、明瞭な非接触ダイバータプラズマが形成された。欧州のJETでは単一種類の不純物よりも、N+Ne, N+Arなど複数の不純物を混合して入射する方が閉じ込めがより改善する傾向が示された。アメリカのDIII-Dではダイバータトムソン計測と分光計測を組み合わせることで解析することによって、ダイバータプラズマ中の電子密度に対する炭素イオン密度比を0.2%と評価した。ASDEX-Upgrade, TCV, EAST, DIII-Dからは非接触ダイバータプラズマ中の電子温度のフィードバック制御について報告された。不純物入射によりプラズマの電子温度を5 eVまで緩やかに低下させることは可能であったが、更に低下させようと制御すると電子温度が急激に低下し、5 eV以下の部分非接触ダイバータプラズマの定常維持は困難であった。小林（核融合研）は、N入射停止後、非接触ダイバータプラズマが接触ダイバータプラズマへ遷移するのに要する時間がLHDでは0.1秒であるのに対し、W7-Xでは1秒であることを報告し、両装置間の不純物輸送の違いについて議論した。

金属壁装置におけるヘリウムプラズマ運転の影響：ドイツのGLADISやPSI-2装置でヘリウムプラズマの照射によりナノ構造を生成させたタングステン材サンプルをASDEX-Upgradeのダイバータプラズマに曝した。その後、取り出したサンプルを観測した結果、ナノ構造の上にタングステンの堆積が見られ、さらにこの堆積層中へのナノ構造の進展が見られた。

第二スクレイプオフ層（SOL）プラズマの輸送：高密度の放電でSOL領域の外側（第二SOL）でプラズマの密度分布が広がる現象について、Hモードプラズマの実験データに対して議論が進められている。ダイバータが

高リサイクリング状態の際に、ELMバーストの間の時間帯で密度分布が広がることが多くの装置で確認された。この広がりはASDEX-UpgradeやJETの揺動の統計解析からLモードでの現象と同様にSOLでのプロブ輸送による可能性が高い。一方、高密度Hモードプラズマで発生する小振幅ELMのフィラメントとの比較から、フィラメントの径方向の速度やサイズはプロブのそれらよりも大きいことが示された。朝倉（量研）はJT-60UのLモードプラズマの解析結果から、Lモードで第二SOLの密度分布広がりの発生を説明するモデルに修正が必要であることを指摘した。

トロイダルギャップへの熱負荷・溶融過程：伊庭野（阪大）は、自身が開発したPIXYコードによってITERのディスラプション時のBe第一壁への熱負荷を評価した。蒸発したBeによる蒸気遮蔽の効果を考慮すると熱負荷および溶融層厚さは約半分になることを報告した。さらに、MEMOS-Uコードと結合し、プラズマガン装置MK200-UG（ロシア）の結果を参考に溶融挙動の解析を進める予定である。ASDEX-Upgradeでは、接地および浮遊電位タングステンタイルに対するELMによる溶融挙動の比較実験が行われたが、両者のタイル温度の変化の違いにより明瞭な比較実験とはならなかった。

ペDESTアル・三次元磁場構造：ペDESTアル・トピカルグループからの参加者により、DIII-Dにおける共鳴摂動磁場（RMP）印加実験のまとめが報告された。低密度プラズマで発生するType-I ELMの抑制のため、偶パリティのRMPを印加した場合、ELMは完全に抑制されるが主プラズマの密度が低下した。これに対し、高密度プラズマの小振幅ELMの抑制のため、奇パリティのRMPを印加した場合では、主プラズマの密度低下が生じない、などの違いがあった。DIII-DおよびASDEX-Upgradeともに、ダイバータ板上の熱負荷分布はRMP印加によって分裂するが、主プラズマの密度上昇とともにその分裂は消滅したことが報告された。

ITERダイバータの寿命の決定：ITERのダイバータの交換を決断する条件を決定するための装置間比較実験が提案され、その最初の議論が行われた。タングステンプラズマ対向材の適切な厚さやクラックの進展に対する理解、繰り返し疲労に対する評価を進めるため、まずは各装置で発生したタングステンプラズマ対向材のダメージとそれがプラズマ運転に与える影響について情報を収集することから着手する計画である。

タングステン再結晶化：タングステン対向材表面にヘリウムバブルが形成されると再結晶化が抑制され、抑制の程度はヘリウムバブルの径とタングステンの温度に依存するという明確な結論が得られた。この成果により目的が達せられたと判断され、この装置間比較実験を成功裏に終了することが報告された。一方で、タングステンをネオンを含むプラズマに曝した場合にもネオンバブルがタングステン対向材表面に形成され、それが再結晶化を抑制するという類似する新たな成果が報告され、研究の深化も期待される。

（原稿受付日：2020年4月6日）