

■ ITPA(国際トカマク物理活動)会合報告(69)

分野: 「スクレイプオフ層とダイバータ物理」

開催日: 2018年12月11日-12月14日

場所: ウィスコンシン (米国)

担当委員:

朝倉伸幸(量研), 芦川直子(核融合研), 上田良夫(阪大), 大野哲靖(名大), 坂本瑞樹(筑波大), 仲野友英(量研), 増崎貴(核融合研)

(下線は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
スクレイプオフ層とダイバータ物理	2019年7月2日-7月5日	マックスプランクプラズマ物理研究所(ドイツ)

第26回目となる本会合は米国のウィスコンシン大学で開催された. 参加者は77名(日本から4名)で, 総講演数は41件(日本から3件)であった. 国際装置間比較実験(継続4件)の他, 周辺プラズマ輸送コードの開発現状, 及びトリチウムの透過についてのセッションが設けられた. また, ITER Physics Basisの改訂について議論が行われた.

Effects of 3-D fields on divertor conditions and PWI: 国際装置間比較実験に参加した全ての装置で, 高密度(デタッチメント遷移より低い密度)では, RMPによるELMの抑制が効かなくなるという実験結果が得られた. また, W7-Xから, 磁気島ダイバータのSOLの磁力線長が長く, ダイバータの受熱面積が広がる特性を活かし, 熱負荷を分散させ安定なデタッチメント放電を28秒間維持することに成功したことが報告された. 小林(核融合研)は, EMC3-Eireneコードに対して不純物のリサイクリングモデルに改良を加え, LHDにおけるNおよびNe入射実験の解析結果を報告した. また, 不純物のフロー速度の計測とEMC3-Eireneの計算結果の比較を報告した.

Retarded recrystallization of W / plasma operation on damaged W PFCs: タングステン材中にヘリウムバブルが形成されると再結晶化が抑制される現象について, 国際装置間比較実験により, 5装置中4装置でこの現象が認められた. ヘリウム照射時のタングステン温度が低い場合に, 再結晶化抑制の効果が高いことが報告された. これは, ヘリウムバブルの径が小さくなり, Zener ピンチ力による再結晶粒の成長を抑制する力が大きくなるためとの解釈が示された. ヘリウム照射フルエンスを増加させると, 再結晶化抑制効果は飽和することが観測された. これはヘリウムバブルの量が飽和するためであるとの解釈が示された.

Comparison of N_2 and Ne divertor seeding: JET-ILWでは, 高加熱パワー放電($P_{\text{heat}}/R \sim 10 \text{ MW/m}$)にNeを入射することにより, 高閉じ込め, 高放射損失割合($P_{\text{rad}}/P_{\text{heat}} \sim 0.66$), 部分非接触ダイバータ, かつ小さいELMを持つ「Mモード」と呼ばれる放電が得られたことが報告された. 周辺部でNeによる燃料粒子希釈により圧力勾配が増加することが「Mモード」発生の原因であるとの解釈が示された. ただし, Ne量が増加するとLモードに逆遷移することが併せて報告された. ITERのNe入射プラズマに対し

て, SOLPS-ITERによりドリフトを考慮した周辺プラズマ輸送のシミュレーションが行われた. SOL上流における温度が高いため, 内外ダイバータともにほぼ接触状態であった. Neのリサイクリングの空間分布とNeイオンのポロイダルドリフトを考慮して, Neの輸送を検討する必要性が指摘された. DIII-Dでは, SASダイバータ(容積の小さくぼみ)にNを入射した場合, ダイバータプラズマは低温となり主プラズマへの侵入は少なく, 対して, Neを入射した場合, ダイバータプラズマはより高温で主プラズマへの侵入量も多いという実験結果が得られた. よって, 主プラズマ周辺での放射損失を増加するには主プラズマの閉じ込め性能の維持も含め, NよりもNe入射の方が良好であったと報告された. C-Modでは, IモードへNおよびNeを入射すると, Iモードが維持されずLモードへ逆遷移したことが報告された. EASTでは, LH入射による完全非誘導電流駆動プラズマへ, パルスガスパフの帰還制御により不純物入射を行い, 放射損失パワーを制御した. ただし, 放射損失割合は加熱パワーの1/3と低いプラズマに対する実験であった.

Detachment physics and control: 仲野(量研)はJT-60UのLモード非接触プラズマでは, 炭素の圧縮比(主プラズマでの炭素濃度に対するダイバータプラズマでの炭素濃度)の測定結果が約0.03であったことを報告した. DIII-Dから, トロイダル磁場を逆転して運転した場合, 外側ダイバータ板上の粒子束分布が外側に拡がり低温化することが報告され, これはE(ポロイダル)×Bドリフトに起因するとシミュレーション結果から結論された. トロイダル磁場を逆転しない通常の運転での接触から非接触状態への急激な変化もドリフト方向に関係すること, 非接触ダイバータではドリフトの効果は小さくなることが報告された. ダイバータ・トムソン計測装置によって測定されたセパトトリクスに沿う電子温度・密度の空間分布から熱流束を導出し, 特に非接触状態では, 磁力線に沿った熱輸送にはドリフトによる対流的輸送の効果が支配的であることが示された.

New SOL code developments: EMC3の不純物輸送モデルに, 背景プラズマと不純物粒子間の緩和時間を考慮した運動論的モデルの導入が行われた. Wなど, 重不純物の空間分布の計算結果に顕著な違いが見られた. UEDGEコードでドリフト効果(磁場勾配, 反磁性モデル, E×B)の検討が行われ, ダイバータ板のプラズマ分布に対してはE×Bドリフトの効果がもっとも大きいこと, 反磁性ドリフトの定式化による差異は比較的小さいことが報告された. ITERのSOLプラズマにおいて, 熱フラックスの径方向幅の計算が乱流コードXGC1およびBOUT++で行われた. いずれのコードもITERではEichスケーリングより大きい値を予測した(4~6 mm). この理由は, ITERではトロイダル磁場およびプラズマ電流が高いため, SOLでの熱輸送に対するドリフト効果が低下し, トラップ電子による乱流が拡散機構として顕著になるためと説明された.

(原稿受付日: 2019年5月14日)

■ ITPA(国際トカマク物理活動)会合報告(70)

分 野 : 「輸送と閉じ込め物理」¹, 「MHD 安定性」², 「計測」³, 「高エネルギー粒子物理」⁴, 「周辺ペDESTAL物理」⁵, 「統合運転シナリオ」⁶

開催日 : 2019 年 3 月 25 日 ~ 27 日¹,
2019 年 4 月 1 日 ~ 3 日²,
2019 年 4 月 8 日 ~ 11 日³,
2019 年 4 月 9 日 ~ 11 日⁴,
2019 年 4 月 9 日 ~ 11 日⁵,
2019 年 4 月 9 日 ~ 12 日⁶

場 所 : オースチン(米国)¹, デジョン(韓国)², キャンベラ(オーストラリア)³, ロヴァニエミ(フィンランド)⁴, デジョン(韓国)⁵, 那珂(日本)⁶

担当委員 :

井戸毅(核融合研)¹, 田中謙治(核融合研)¹, 田村直樹(核融合研)¹, 本多充(量研)¹, 宮戸直亮(量研)¹, 吉田麻衣子(量研)¹, 今寺賢志(京大)¹, 諫山明彦(量研)², 榊原悟(核融合研)², 白石淳也(量研)², 古川勝(鳥取大)², 政宗貞男(中部大)², 松永剛(量研)², 渡邊清政(核融合研)², 秋山毅志(ゼネラルアトミクス)³, 石川正男(量研)³, 磯部光孝(核融合研)³, ピーターソン・バイロン(核融合研)³, 江尻品(東大)³, 河野康則(量研)³, 藤堂泰(核融合研)⁴, 長壁正樹(核融合研)⁴, 永岡賢一(核融合研)⁴, 篠原孝司(量研)⁴, Andreas Bierwage(量研)⁴, 村上定義(京大)⁴, 山本聡(量研)⁴, 相羽信行(量研)⁵, 浦野創(量研)⁵, 神谷健作(量研)⁵, 大山直幸(量研)⁵, 鈴木康浩(核融合研)⁵, 森崎友宏(核融合研)⁵, 林伸彦(量研)⁶, 鈴木隆博(量研)⁶, 坂本宜照(量研)⁶, 長崎百伸(京大)⁶, 花田和明(九大)⁶, 藤田隆明(名大)⁶, 横山雅之(核融合研)⁶

(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
輸送と閉じ込め物理	2019年10月14日-17日	合肥 (中国)
MHD安定性	2019年10月14日-17日	ガルヒン (ドイツ)
計測	2019年10月 7日-10日	ITER機構 (フランス)
高エネルギー粒子物理	2019年 9月 9日-11日	那珂 (日本)
周辺ペDESTAL物理	2019年10月14日-16日	合肥 (中国)
統合運転シナリオ	2019年10月14日-17日	ガルヒン (ドイツ)

1. 「輸送と閉じ込め物理」

第 22 回となる本会合は 27 名 (日本 2 名, 欧州 8 名, 米国 12 名, 中国 2 名, 韓国 1 名, ITER 機構 2 名) が現

地参加した。リモートでの発表は 12 件だった。前週に同じオースチンで開催された US-EU Transport Task Force (TTF) 会合に引き続いての会合であったため, 大多数が欧州と米国からの参加者であった。会合では, 不純物輸送, I モード, L モードプラズマにおける最外殻磁気面近傍の輸送, ジャイロ運動論データベース構築, ニューラルネットワークによる第一原理シミュレーションを模擬するモデリング, ペレット入射下における粒子輸送, LOC-SOC 遷移と関連する現象論の理解のそれぞれについて複数の報告があった。これらのセッションに加えて, ITER Physics Basis (Nuclear Fusion 誌) の改訂に関して議論がなされ, 改訂が必要であると判断したトピックについては, 個別にレビュー論文を執筆する方針で進めることになった。加えて, ITER 機構から ITER リサーチプランに関する最新情報が提供された。輸送と閉じ込め物理トピカルグループ (TG) に関連する項目の大部分はこれまで会合で扱われてきた内容と一致しているが, 再調整や追加すべき事項もあることが確認された。後述するように, 今回の会合でも ITER リサーチプランに沿った取り組みが報告された。

不純物輸送に関するセッションでは, ASDEX Upgrade (AUG) で観測されたタングステンの蓄積が統合モデリングで再現され, この蓄積は ECH パワーの増大によって電子密度勾配を緩やかにすることで抑制できることが報告された。また, full-f ジャイロ運動論コード GT5D と GYSELA からは乱流と新古典輸送の相乗効果の重要性が示唆され, 乱流によって静電揺動のポロイダル方向の対称性が破れることでタングステンの新古典輸送に影響が生じることが示された。実験データを用いた full-f シミュレーションの検証や簡約化による統合コードへの導入が今後の課題である。

前回会合で新規提案された L モードプラズマにおける最外殻磁気面近傍の輸送のセッションでは, 特に ITER での初期の Pre-Fusion Power Operation (PFPO) フェーズにおけるプラズマを対象としている。ITER リサーチプランの議題の一つとなっている LH 遷移について, 遷移のしやすさは L モードプラズマの輸送に依存するため, PFPO フェーズを想定したプラズマに対するジャイロ流体モデル TGLF などの予測精度の検証を行うための DIII-D の実験提案が紹介された。また, BOUT++ の六場二流体モデルで DIII-D の LH 遷移時の密度揺動の波数スペクトルを再現できることが示された。加えて, 電流立ち上げ時のシミュレーションでは, CDBM モデルを用いて最外殻磁気面付近の熱輸送を精度良く予測することで JET の安全係数の時間発展を再現できることが報告された。本セッションでは今後, 統合運転シナリオ TG との協力で ITER リサーチプランに更に沿った検討が行われていくと思われる。

ニューラルネットワークによる第一原理シミュレーションを模擬するモデリングのセッションでは, 継続的に報告されてきたモデルの進展が報告され, 日本の JT-60U 実験とジャイロ運動論コード GKW に基づくモデルでは, 粒子輸送のみを扱うモデルから熱輸送も同時に解く

ための改良, 欧州の準線形モデル QuaLiKiz ベースモデルでは回転効果の導入, 米国の OMFIT フレームワークを用いたモデルでは, ニューラルネットワークモデルを含む統合モデリングの枠組みで不純物輸送を自己無撞着に解くための改良が示された. 加えて, ベイズ統計に基づくガウス過程回帰で温度や密度などの分布当てはめを行い, ニューラルネットワークの学習に用いるジャイロ運動論コードやジャイロ流体モデルの入力に利用する計画が報告された. このような活動は, ジャイロ運動論データベース構築のセッションと関連しており, 両セッションは今後も連携しながら進むと思われる.

ペレット入射下における粒子輸送のセッションでは, 高磁場側からのペレット入射時の密度の変化は拡散過程で決まると考えられてきたが, DIII-D では $E \times B$ ドリフト無しにペレットがトーラス方向に通過しているような観測結果が得られ, この軌道が ELM 制御に関係していることが示唆された. また, JET においてペレットが繰り返し入射された実験での密度の時間変化が, QuaLiKiz を輸送モデルとして用いた統合シミュレーションで再現された.

最後に, LOC-SOC 遷移と関連する現象論の理解のセッションでは, LOC から SOC への遷移時に優勢な不安定性が捕捉電子モードからイオン温度勾配モードに変わることや, 回転分布形状が変化することが以前から示されていたが, DIII-D ではこれらの不安定性と回転分布の変化が時空間で矛盾していないことが報告された. また, このセッションでこれまで明らかになった現象のレビューが示され, それによってはっきりした未解決事項も明示された形で論文が準備されており, セッションがクローズされることが報告された.

2. 「MHD 安定性」

第 33 回となる本会合には, 日本 2 名, 欧州 9 名, 米国 8 名, 中国 3 名, ロシア 1 名, 韓国 6 名, ITER 機構 2 名が参加した (TV 会議参加を含む). 今回の会合では, ITER における検討の進捗の他は, 主に「ディスラプション時の電磁力負荷」と「粉砕ペレット入射 (SPI)」のトピックスに絞って発表が行われ, その結果について参加者で議論した.

ITER のディスラプション緩和システム (DMS) では, 斜め上ポートに 3 箇所, 水平ポート 3 箇所に設置される. 今回, 斜め上ポートの設計状況について説明があり, 水平ポート同様, 空間の制約から 1 ポートあたり 1 つのペレット生成装置が設置されることが説明された. また, DMS を効果的に開発するために, DMS タスクフォースが立ち上げられ, 実験, 工学, 理論/モデリングの領域で検討が進められている. 各領域において 2019 年初頭にキックオフミーティングが開催され, 検討項目を決めたことが説明された.

ディスラプション時の電磁力としては, 複数の要因が考えられており, いくつかモデルが提唱されているが, 異なった結果が出ている場合がある. 今回の会合では, 計算コードを用いた初期結果の報告があった. 最終的に

は 3 次元モデルでの計算を行う予定であり, 今回の会合でも一部の結果が報告されたが, 予備的な結果であった. 例えば, ANSYS で Grad - Shafranov 方程式を解くツールを開発したことが報告された. これにより, 汎用的なツールを使って ITER などの電磁力解析が可能となった. 会合では, CARMA0NL とのベンチマークにより両者がよく一致することや, トロイダル方向に 20 度分のモデルを用いて計算をした例が紹介された.

SPI の実験結果として, DIII-D における 2 系統の SPI 装置を用いた結果が報告された. 赤外線カメラの視野に入る SPI 入射口から入射した場合と, 視野に入らない SPI 入射口から入射した場合の赤外線強度分布の差分から非対称性を見積もった結果, ピーキングファクタは 1.3 程度であり, ITER での制限 (=2) よりも小さいことが報告された. JET からは, SPI 装置の据え付けやペレットの生成が終了し (入射はなし), 2019 年の 7 月から 12 月に SPI 実験が予定されていることが説明された. KSTAR では SPI 装置を 2019 年と 2020 年に 1 系統ずつ設置 (トロイダル方向に 180 度離れた位置) することを予定している. SPI の効果を確認するため, トロイダル方向に異なる 3 箇所新たに高速ボロメータを ITER 機構の予算で設置することが説明された. このほか, 中国の J-TEXT や HL-2A で SPI 装置を導入し, 早速実験が行われたことが報告された.

ディスラプション時の電磁力に関する共同解析, SPI に関する共同実験, sideways force (ディスラプション時に真空容器の水平方向のある向きに発生する力) に関する共同実験を新たに立ち上げることになり, 具体的な検討内容について議論した.

ITER に向けた各研究領域の研究成果をまとめた ITER Physics Basis の改訂版を執筆することについて, 今年 1 月の ITPA 調整委員会で議論が行われたが, ITER 機構側からの寄与が見込めないことから, 全 TG 合同での執筆はしないことになったことが報告された. これを受け, 本 TG でも現段階では執筆しないことで合意した.

次回の会合は統合運転シナリオ TG と合同で開催する予定である. 本会合では, 次回会合における合同セッションのトピックスとして, プラズマ制御とディスラプション回避を候補として挙げることにした.

3. 「計測」

第 36 回計測 TG 会合がオーストラリア国立大学で開催された. 本会合には, 約 40 名が参加した (内訳 (含遠隔参加) / 日本 3 名, 韓国 7 名, 米国 2 名, EU13 名, ロシア 1 名, 中国 4 名, インド 2 名, オーストラリア 6 名, ITER 機構 1 名). 主な内容を以下に記す.

ITER の計測における最重要課題への取組みとして, プラズマ制御システムへの要求事項に関連した報告があった. 複数の計測装置による同一物理量の測定結果及び第 1 原理的なモデルを統合した解析によって, 測定誤差や計測装置の不具合による影響を受けにくい堅牢なプラズマ制御が可能になるという説明があった. 具体的には, AUG と TCV において, 干渉計及び制動放射による

電子密度計測と質量保存則及び径方向の輸送を統合的に解析することで、干渉計のフリンジジャンプが生じた場合でも、プラズマ放電時間全体に渡り、トムソン散乱計測による電子密度分布と矛盾しない結果が得られた。様々な物理量に対して研究を重ねることで、限られた計測装置を用いて原型炉及び商用炉のプラズマを制御するための知見を蓄積することが期待できる。

複数の実験装置で横断的に同一テーマを研究する共同実験について、以下のとおり議論した。ITERでは金属製第一壁の放射率が低く反射率が高い上、それらの値や指向性が第一壁の表面状態によって変化してしまうため、赤外サーモグラフィを利用してブランケットやダイバータの温度分布及び熱負荷を精度良く測定することが容易ではない。この問題を解決するために、WEST及びAUGで赤外光の反射に関するベンチマーキングが計画されている。それに先立った基礎実験として、タングステン試料の双方向反射分布関数に関する入射角、反射角、波長、面粗さの依存性が報告された。また、ガンマ線制動放射の分光によるディスラプション時の逃走電子発生・消失機構の解明に向け、準備状況が説明された。これまでにLaBr₃検出器と光電子増倍管を利用したMHzの高速カウントが可能な測定系が開発され、DIII-D及びAUGで初期的な実験結果が得られ始めており、JET及びEASTでも2019年中頃に実験が開始されるとのことであった。核融合研のピーターソン氏から赤外イメージングビデオボロメータと抵抗ボロメータの相互比較実験について新たに提案があり、次回の会合において採用の可否が議論されることになった。

各国から最新の研究開発成果に関する多数の報告があった。以下に抜粋を示す。ITER機構からは、ファーストプラズマに必要な磁場計測装置の実機製作を通じた教訓やポート外の空間をベリリウムで汚染させずに2重真空窓を交換するための保守作業手順構築など、建設に向けて工学的な成果が積みあがっていることが示された。欧州からは、幅広いアプローチ(BA)活動フェーズIIの枠組みでJT-60SAに設置される予定の計測装置に関する設計の進展について報告された。

日本からは、下記の報告を行い、参加者と議論した。量研の谷塚氏から、ITER周辺トムソン散乱計測装置用の加振試験について、ディスラプション時の真空容器の振動をかなり保守的に想定して定めた加速度波形を印加しても300回程度の繰返し負荷に耐えられることを報告した。また、日本におけるITER計測装置開発に関する進展を報告し、日本が担当する5つの計測装置(マイクロフィッションチャンバー、ポロイダル偏光計、周辺トムソン散乱計測装置、ダイバータ赤外サーモグラフィ、ダイバータ不純物モニター)でプロトタイプ製作等を着実に進めていることを示した。核融合研の西谷氏からは、ITERで核融合出力や中性子フラックス・フルーエンスを測定するための中性子計測装置の感度較正についての検討が報告された。ITERでは、DD実験の前に実施する中性子計測装置の較正においても中性子発生器を使用することが計画されているが、中性子の発生に指向性が

あり、核融合プラズマからの中性子発生量と信号強度を関連付けるためにはモンテカルロシミュレーションを高精度に行う必要があることが指摘された。

その他、ITER Physics Basisの改訂に関する議論が行われたが、記述すべき内容や担当者について合意には至らず、次回会合で結論を出すことになった。

4. 「高エネルギー粒子物理」

第22回となる本会合は、ロヴァニエミ(フィンランド)にてAalto大学の主催にて開催された。参加者はリモート参加も含め約40名、35件の発表があった。

はじめに、ITERの進捗状況がITER機構のPinches氏から報告された。今回ITERリサーチプランにおける優先R&D課題のうち高エネルギー粒子物理に関わる課題の報告が行われた。本TGは課題の解決に向けて対応することとなる。

共同実験の報告は次のとおりである。ELM(周辺部に局在した不安定性)と共鳴磁場摂動(RMP)などの周辺磁場摂動に起因する高速イオン損失を扱う共同実験EP6においては、AUGとKSTARで新たなRMP配位での実験結果が報告された。解析ではRMPについてMEGAコードあるいはプラズマ応答を考慮した3次元磁場と高速イオン輸送解析コードASCOTを使った数値計算の進展が報告された。加えて、ASCOTを使用してELM崩壊時の高速イオンの輸送についても解析の準備が進んでいた。不安定性を考慮した中性粒子ビーム(NB)電流駆動の検証を扱うEP8では、KSTARから新しいデータの提供があった。電子サイクロトロン電流駆動(ECCD)によってアルヴェン固有モード(AE)を抑制することに成功し、高速イオン閉じ込めと蓄積エネルギー改善が見られるとともに周囲電圧の低下が観測されNB電流駆動効率の改善が示唆されていた。イオンサイクロトロン放射(ICE)の損失高速イオン診断への利用を評価するEP9については、TUMAN-3M, AUG, NSTX, DIII-Dより実験データ解析の報告があった。加えて、ICEの研究を長年行ってきたDendy氏によるレビュー講演があった。計測による高速イオンの速度空間分布再構築を議論するEP11では、DIII-Dの高速イオンD alpha計測(FIDA)への適用が報告された。今回、計測情報がない反電流方向へ動く高速イオンの取扱について詳細な検討結果が報告された。いくつかの取扱手法が示されたがAEの影響の有無の差分を観測する分にはいずれの手法でも類似の結論が得られることが示された。AE制御のアクチュエータ検討に関する共同実験EP12については、TCV, AUG, DIII-D, KSTAR, LHDより最新の実験解析の報告があった。加えて、新たな共同実験として、ITERの軽水素実験でのICRF加熱において想定される様々な三イオン加熱スキームが示され、その定量的な証明のための共同実験が提案され、実施することとなった。

数値計算のベンチマーク活動については、ベータ誘起AE(BAE)とベータ誘起アルヴェン音響波固有モード(BAAE)を対象としたベンチマーク活動について報告があった。DIII-Dの実験結果を対象としたベンチマーク

ケースについて、NOVA, LIGKA, GTC, KINX, VENUS, ORB5, FAR3D コードを用いた報告があった。それぞれコードの思想／モデルが異なっているが、それぞれ異なった不安定性が実験観測の周波数領域に観測され、ベンチマークとしては難しい対象である。ITERの標準運転シナリオに基づくベンチマークケースでは、前回鋸歯状振動が不安定で本ベンチマークには不適切なため、ベンチマーク活動用には安全係数分布の若干の修正が必要である旨結論された。今回 JT-60U の定常放電を参考に安全係数分布が全域で1を切らないようにわずかな修正を加えた配位が提案され、これを用いた解析を進めることとなった。また、JET の DT キャンペーンに向けて多種イオンを扱った MHD/AE 安定性解析コードのベンチマークの提案があった。

不安定性については、この他に音響波の周波数と同程度の周波数差をもつ2つのトロイダル AE (TAE) が音響波を励起し、TAEの飽和と高速イオンからバルクプラズマへのエネルギー移送に貢献するという理論研究の報告や、LHDで観測された高速イオン駆動測地線音波振動モード (EGAM) について高速イオンからバルクプラズマへのエネルギー移送に関する報告があった。

今回、主催者が ASCOT コードの開発グループであったことから、ASCOTに関する報告が多数あった。扱える現象が増えているだけでなく、計算効率も8倍ほど改善していた。また、幅広い適用例が紹介された。

加えて、ITER Physics Basisの改訂の進め方について議論した。本 TG 単独のレビュー論文として進めることとし、次回は具体的な内容を議論することとした。

5. 「周辺ペデスタル物理」

第35回となる本会合には20名(欧州6名、米国3名、ITER機構2名、日本1名、中国4名、韓国4名)の参加者があり、ITERの最重要課題であるELMの物理と制御、Hモードペデスタル構造の理解、国際装置間比較実験等の現状報告に関して討議が行われた。

RMPによるELM抑制領域へのアクセス条件に関する議論が行われた。DIII-Dでは、ペデスタルトップ位置での $E \times B$ 速度がゼロ値となることがELM抑制の鍵であることを示唆する実験結果が示された。また、これに伴ってペデスタル部でのトロイダル回転速度にもELM抑制領域への遷移が起こる閾値が存在し、この値はプラズマの三角度に依存し、時間的に三角度を低下させる実験を実施し、ある値以下でELMが出現するという実験結果が示された。同様の傾向はKSTARでも観測されているが、ペデスタル部のトロイダル回転速度の閾値はDIII-Dに比べて大きい。AUGもペデスタルトップ位置での $E \times B$ 速度がゼロ値となることが鍵となることを示す結果が示されているが、このときのペデスタル部でのトロイダル回転速度には明確な遷移の閾値が現れない一方で、ペデスタル電子密度がある値以下でしか遷移が起こらないという結果が示された。

ペデスタル構造に関するセッションでは、近年注目を集めている電子密度分布と電子温度分布のシフトに関

する報告があった。EPEDモデルでは、ペデスタルの位置は電子密度と電子温度で同じであると仮定しているが、JET や AUG において、ペデスタルの位置や幅は必ずしも同一ではない結果が示されている。JET では、ITER 類似壁を導入後にペデスタル部の圧力分布が、ELMが発生すると考えられている peeling-ballooning モードの安定性限界から離れる傾向が観測されているが、特にこのシフト量は周辺圧力勾配の実験値に対する peeling-ballooning モードの安定性限界値の比が増大するほど大きくなることが示された。

本会合では、本年1月のITPA調整委員会で示されたITER優先課題に関する議論が行われた。昨年にまとめられたITERリサーチプランに基づき、優先課題として挙げられたリストから「周辺ペデスタル物理」TGに該当する研究項目の説明があった。ITERでは、Heを用いた非放射化フェーズにおいてHモード実験及びRMPコイルの試験が計画されている。しかし、運転計画の効率化のために、この目的のために特別にHeフェーズを導入しなければならないのか、或いは軽水素フェーズにおいて、10%のHeガスを入射した状態で実験で目的を達成できるのかを検討することが最優先項目として挙げられた。次回の会合において、各項目の取り組みや装置間比較実験の立ち上げ等について議論を行う方針で合意した。

6. 「統合運転シナリオ」

今回は統合運転シナリオ TG (Integrated Operation Scenarios Topical Group: IOS-TG) の第22回目の会合で、量研那珂核融合研究所で開催された。日本8名、欧州9名(内、TV会議参加3名)、米国5名(内、TV会議参加3名)、韓国3名、中国3名、ITER機構3名が参加した。

IOS-TGは、ITERの運転シナリオに関する課題について議論し、参加極における関連研究を通じて最適な運転シナリオと必要な制御手法を提案することが主な役割である。IOS-TGから提案しているITER運転シナリオの開発に関する国際共同実験やモデリング活動の進捗の報告と議論、新たな共同取り組み課題の提案、運転シナリオモデリングに関する発表と議論などが行われた。課題は多岐にわたるため、他のTGとの連携を図るという観点で、他のTGにも参加しているメンバーから、それぞれのTGの状況報告も行われた。特に、今年秋に合同会合が予定されているMHD-TGメンバーによるリモート参加での議論が集中的に行われた。

ITER機構から、ITERが必要とする100を超えるR&Dの暫定リストが提示された。リストでは、各々のR&Dの必要性が3段階(category 1, 2, 3)にランクづけられ、その解決がいつまで(燃焼前運転PFPOおよび燃焼運転FPOの各段階に対して)に必要とされるかが示された。それらのR&D項目の中でIOS-TGが対応するのが適当であると考えられるものを抽出し、既存のJoint Experiment (JE), あるいは、Joint Activity (JA) の枠組みで対応可能であるか、もしくは新規の取り組みを立ち上げる必要

があるか、といった観点での議論が多く、時間を割いて行われた。JE や JA について、適切な優先度と期限 (short term (<2 年), medium term (<5 年), long term (>5 年)) を設定し、ITER の運転シナリオ開発により実質的な貢献ができるように展開していくことが議論された。

各国装置の IOS に関連する実験の現状報告と今後の計画が報告された。その中で、井手氏 (量研) から建設が進む JT-60SA の真空容器やトロイダルコイル等の組み立て状況が報告され、スケジュール通りに進捗していることが示された。辻村氏 (核融合研) から「Real-time control of ECH operation in LHD」に関する最近の研究進展の報告が行われ、LHD の高温プラズマにおける密度変化に伴う ECH 偏波調整による加熱性能維持、閉じ込め性能向上の実例が示された。

ITER の First Plasma に向けたプラズマ着火のセッションでは、JE に付随した実験データの解析や着火のシミュレーションコードのベンチマーク活動等が報告された。その中で、花田氏 (九大) から「Plan for contribution of

plasma start-up from Japanese STs」が報告され、ITER における EC を用いたプラズマ立ち上げに対して QUEST や TST-2, LATE が持つ特長を活かした JE 参加のため、関係者との議論が行われた。

制御のセッションでは、ITER での使用を想定した制御の検討状況が報告され、次回行う MHD-TG との合同会合で議論する項目と参加者等を議論した。その中で、若月氏 (量研) は、機械学習を用いたイオン温度分布制御について報告し、JT-60U 実験の内部輸送障壁のある分布の時間発展を統合コード TOPICS で模擬して加熱応答を強化学習し、適応制御を実証した結果を示した。次回の MHD-TG との合同会合では、ディスラプション回避、例外処理と停止シナリオ、プラズマ立ち上げ時の制御逸脱抑制、分布や MHD モード等の統合制御の 4 つの項目を議論することにし、各々の項目で担当者を選び参加者を募ることになった。

(原稿受付日：2019 年 5 月 14 日)