

■ ITPA(国際トカマク物理活動)会合報告(65)

分野:「MHD 安定性」¹,「周辺ペデスタル物理」²,「輸送と閉じ込め物理」³,「統合運転シナリオ」⁴

開催日:2018年3月5日～9日¹,4月4日～6日²,
4月9日～11日³,4月9日～12日⁴

場所:那珂(日本)¹,ストックホルム(スウェーデン)²,
デジョン(韓国)^{3,4}

担当委員:

諫山明彦(量研機構)¹, 榊原悟(核融合研)¹, 白石淳也(量研機構)¹, 古川勝(鳥取大)¹, 政宗貞男(京都工繊大)¹, 松永剛(量研機構)¹, 渡邊清政(核融合研)¹, 相羽信行(量研機構)², 浦野創(量研機構)², 神谷健作(量研機構)², 大山直幸(量研機構)², 鈴木康浩(核融合研)², 中嶋洋輔(筑波大)², 森崎友宏(核融合研)², 井戸毅(核融合研)³, 田中謙治(核融合研)³, 田村直樹(核融合研)³, 本多充(量研機構)³, 宮戸直亮(量研機構)³, 吉田麻衣子(量研機構)³, 今寺賢志(京大)³, 林伸彦(量研機構)⁴, 鈴木隆博(量研機構)⁴, 坂本宜照(量研機構)⁴, 長崎百伸(京大)⁴, 花田和明(九大)⁴, 藤田隆明(名大)⁴, 横山雅之(核融合研)⁴

(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
MHD安定性	2018年10月1日～3日	ナポリ (イタリア)
周辺ペデスタル物理	2018年10月29日～31日	サン・ポール・レ・デュランス (フランス)
輸送と閉じ込め物理	2018年9月17日～20日	サン・ポール・レ・デュランス (フランス)
統合運転シナリオ	2018年10月29日～31日	サン・ポール・レ・デュランス (フランス)

1. 「MHD 安定性」

第31回となる本会合は日米MHDワークショップと合同で開催され, 日本26名, 米国13名, 欧州7名, 中国6名, 韓国5名, ロシア3名, ITER機構3名が参加した(人数は概数でTV会議参加を含む)。会合では, 新古典テアリングモード(NTM), ディスラプション, 誤差磁場(3次元磁場効果含む)等に関するセッションのほか, JT-60SAに特化したセッションが設けられ, JT-60SAの建設状況やMHD分野の研究項目が説明されて活発な議論が行われた。

モードロックが発生する誤差磁場強度のスケーリングの構築が複数装置の実験結果を用いて進められている。パラメータとして, 電子密度, トロイダル磁場強度, プラズマ大半径, 規格化ベータ値を入れているが, トロイダル回転速度依存性が実験で観測されたことを受け, トロイダル回転速度をパラメータに入れた例が紹介された。

また, トロイダルモード数 n が1と2のモードロックの発生強度を統合したスケーリング式の説明もあった。

ITERのトカマク建屋の構造物に起因する誤差磁場を評価した結果が報告された。オーバーラップモデルに基づいて計算した $n=1$ の誤差磁場の大きさはトロイダル磁場の 10^{-5} 程度であり, モードロックが発生すると予想される強度よりも小さいとの説明があった。

ロックモードに関し, AEOLUS-ITコードを用いたテアリング不安定な場合のシミュレーション結果の報告があった。回転磁場の高調波と磁気島との相互作用により強いフローシアが形成され, 磁気島の飽和幅が小さくなることが説明された。

逃走電子発生に関して, EXTREM コードを用いたシミュレーション結果の報告があり, 不純物入射後の放射冷却によるテアリングモードの発生, ホットテイル機構による逃走電子の生成, 雪崩機構による逃走電子の増大という一連の過程が計算できるようになったとの説明があった。

ディスラプション予測に関し, DIII-D のデータを用いた回帰木分析及び分類木分析をPPPL及びMITのグループがそれぞれ行っていることが説明された。また, 各解析においてディスラプションと各物理量との関連度が説明された。

NTMに関し, 鋸歯状振動崩壊が発生してからNTMによる磁気島が形成される過程を解析した結果がASDEX Upgradeからあり, 鋸歯状振動崩壊自体よりも長い時間スケール($10^{-3} \sim 10^{-2}$ 秒)で磁気島構造が形成されるとの説明があった。

プラズマ平衡制御に関し, 信号処理法を改善してノイズを低減するとともに制御アルゴリズムを改良することにより, 非円形度が2を超えるプラズマを維持することに成功したとの結果がKSTARから報告された。

LHDから, プラズマ回転の低下を伴う不安定性について, 磁気島構造がある場合とない場合とを比較した結果が報告され, モード周波数の時間変化や共鳴面の移動速度などがよく似ているとの説明があった。また, EIC(Energetic particle driven resistive InterChange)モードと呼ぶ不安定性に関する報告があり, 磁場揺動強度の増大とともに揺動の空間広がりが拡大することや, 軽水素ビームの場合に比べ重水素ビームの場合の方がEICモードが発生しにくいことが報告された。

共同実験やワーキンググループ活動では, 代表の交代はあるものの研究課題の増減はなかった。ITER Physics Basisの改訂に関する議論も行った。会合前にITER科学技術部長から提示された方針に基づいて議論した結果, ITER研究計画が開示された後に執筆等を始めることになった。

2. 「周辺ペデスタル物理」

第33回となる本会合には20名(欧州11名, 米国4名, ITER機構2名, 日本1名, 中国2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, LH遷移の発生条件等の現状報告

に関して討議が行われた。また本会合より本トピカルグループの議長が R. Maingi 氏 (PPPL) から浦野氏 (量研機構) に交代した。

ITER ではタングステンの主プラズマへの混入が懸念されており、非線形 MHD コード JOREK を用いた、ELM によるタングステンの輸送に関する報告があった。電離、再結合過程を考慮した解析の結果、タングstenは ELM で生成された電場による軌道に支配され、ELM 中のエルゴディックな磁場はタングsten輸送に大きく影響しないことを示した。ITER では、タングstenのスクリーニング効果により大量のタングstenがセパトリス外に存在することから、ELM によってタングstenがセパトリス内に侵入しうることが示唆された。

ASDEX Upgrade からは小振幅 ELM とセパトリス密度の関係について報告があった。ガス注入された小振幅 ELM のプラズマと同一の衝突周波数を持つガス+ペレット入射及びペレット入射のみのプラズマを比較したところ、ガス注入、ガス注入+ペレット入射、ペレット入射のみの順で ELM の振幅が増大し、周波数が減少した。このとき、周辺温度分布には大きな相違は見られなかったが、セパトリス電子密度が高いほど ELM の振幅が減少する傾向が観測され、セパトリス密度が ELM 制御の重要なパラメータであることが示唆された。

JET で構築されているペDESTAL データベース (DB) に関する報告があった。EUROfusion では、JET, ASDEX Upgrade, TCV, MAST の装置間の比較・検証のために、ペDESTAL DB を共通の定義・フォーマットで構築し始めている。JET では 1600 のペDESTAL データを蓄積しており、これらには実験データだけでなく、ELITE コードによる peeling-ballooning モードの不安定性解析データも含まれている。JET では、特に金属壁移行後の高衝突周波数領域でペDESTAL 構造が EPED モデルに整合しないことが見られていたが、DB による解析の結果、このような EPED モデルとの相違は、周辺構造が peeling-ballooning モードの不安定性と合致しない場合に起こっていることが分かった。

ASDEX Upgrade と Alcator C-Mod から、イオン熱流束を用いて LH 遷移を表記する報告があった。従来、LH 遷移は全遷移パワーを用いて表現されてきたが、 $E \times B$ シアによる乱流抑制を考慮した場合、イオン熱流束の方が遷移現象をよりの確に捉えると理論的に云われてきた。ASDEX Upgrade では、低密度領域での LH 遷移時のイオン熱流束は電子密度に比例することが示された。また、Alcator C-Mod では、LH 遷移の低密度ブランチは、電子-イオンの熱交換が減少したことで生じるという解析結果が示された。

ITER Physics Basis 改訂に関する議論が行われた。本トピカルグループとしては、ITER Physics Basis は全トピカルグループで編成されたドキュメントの中の 1 つの章として貢献することで合意した。一方で、周辺ペDESTAL トピカルグループとしての単独レビュー論文では、執筆や取りまとめの労力と成果のインパクトとのバランスを考えると価値が低いという議論があった。

3. 「輸送と閉じ込め物理」

第 20 回となる本会合には 46 名 (日本 4 名, 欧州 9 名, 米国 4 名, 中国 3 名, 韓国 24 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。2 日目午後は統合運転シナリオトピカルグループとの合同セッションが NFRI で開催され、ITER 運転シナリオ開発に向けたモデリングの進展と、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開発状況が報告された。グループ単独では、共同実験・共同活動に関して、I モード、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、ジャイロ運動論データベース構築の最新状況、不純物輸送、のそれぞれについて複数の報告があった。加えて、準線形モデルの妥当性検証と、full-f ジャイロ運動論モデリングのセッションも開かれた。これらのセッションに加えて、近頃 ITER 機構から打ち出された ITER Physics Basis 改訂に関する編纂方針の変更を受けて、今後のトピカルグループの方針について議論がなされた。グループの一致した意見として、ITER リサーチプランを物理面で補完するための最先端のトカマク物理研究成果をまとめると共に、残された課題についても言及する形で、改訂を推進していく方針が確認された。ITER 機構から ITER 建設状況の紹介、ITER での重要な輸送研究項目の提示と、議長から今後の ITPA 活動予定が示された。

準線形モデルの妥当性検証セッションでは、準線形モデル開発の進展として、線形成長率の予測性能を向上させた TGLF-2.0 の紹介と、JET 実験データを用いた QuaLiKiz の広範に渡る妥当性検証の報告があった。また、新たなパラダイムに基づく輸送ソルバー開発として、遺伝的アルゴリズムによるフラックスマッチングコード GOTRESS と、遺伝的アルゴリズムとガウス過程回帰を組み合わせた輸送モデル妥当性検証コード VITALS の紹介があった。

高上側三角度の ASDEX Upgrade プラズマにおいて、共鳴磁場摂動(RMP)によって ELM が完全に抑制された状況でペレットを打ち込むと、ペレットによって ELM 様の現象が惹起され、繰り返しの入射により最終的には ELMy H モードに戻ってしまう現象が報告された。

Alcator C-Mod において、自発回転は異なるがその他のパラメータが同一の 2 時刻において CGYRO を用いた線形安定性解析を行った結果、最も不安定なモードに差はないが、異なる波数帯からの寄与を重ね合わせることで自発トルクの差が説明できるという報告があった。

実時間計算を目指したニューラルネットワークシミュレーションモデルのセッションは統合運転シナリオトピカルグループとの合同であり、欧州で進む QuaLiKiz ベースの研究と米国の OMFIT フレームワークを用いた EPED-NN, TGLF-NN, NEO-NN の紹介がなされた。GKW の線形計算結果と JT-60U 実験値から求めた拡散係数を組み合わせた半経験的モデルを学習させたモデルの説明と分布予測性能についての報告があった。

今回日本と欧州で full-f シミュレーションに携わる委員が 2 名加わったことを受けて、full-f セッションが設け

られた。GKNETを用いた分布の自己相似緩和や運動量注入による内部輸送障壁形成に関するシミュレーションに続き、GYSELAからはコア乱流に対する境界条件の影響とその重要性についての発表があり、最後にGT5Dによる多種不純物を含めた乱流による新古典粒子輸送増大メカニズムに関する報告があった。

不純物輸送のセッションでは、DIII-Dからは炭素の、ASDEX Upgradeからはホウ素の粒子輸送と密度分布に対する実験観測とジャイロ運動論コードとモデリングによる予測を比較した発表があり、両者とも良好な一致を得ている。EASTからは電子サイクロトロン加熱(ECH)による中心電子加熱とRMPの両方で高価数不純物のコアへの蓄積を抑制できるとの発表があった。

4. 「統合運転シナリオ」

今回は当グループの第20回目の会合で、韓国の大田市のNFRI近くのホテルで開催された。日本4名(内、TV会議参加2名)、欧州9名(内、TV会議参加2名)、米国6名、韓国8名、中国1名、ITER機構4名が参加した。

本トピカルグループは、ITERの運転シナリオに関する課題について議論し、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。そのために会合では、グループから提案しているITER運転シナリオの開発に関する国際比較実験の進捗の報告と議論、軽水素やヘリウムを用いた非放射化フェーズ運転、プラズマ制御手法、運転シナリオのモデリングに関する発表と議論を行った。さらにITERプラズマの統合モデリングと輸送モデルに関して、輸送と閉じ込め物理トピカルグループと合同の会合を持った。また一昨年開催されたIAEA核融合エネルギー会議で発表されたグループ共同論文のフォローアップおよび次回の会議で発表する共同論文の議論があった。

ITER機構からは、ITER計画および組織の現状、特にファーストプラズマに向けた装置や運転シナリオの検討状況についての報告があった。非放射化フェーズでは定格の半分のプラズマ電流/トロイダル磁場(7.5 MA / 2.65 T)での運転、さらに初期の運転時期に定格の1/3の運転(5 MA / 1.8 T)を行うことが検討されている。これらの磁場では電子サイクロトロン波を用いたプラズマ着火が懸案となっており、本会合で議論が行われた。その中で、2.65Tの場合の第二高調波の共鳴によるECHについてGENRAYコードを用いて解析した結果および、0次元モデルとQUEST実験を用いた着火の検討結果について米田(九大)から報告され、その

モデルを含めた各国のシミュレーションコードのベンチマーク活動が提案され検討することになった。一方、1.8T運転シナリオの共同モデリング活動が議論され、TOPICS(量研)とTASK(京大)が参加して検討することになった。また、ITER機構で開発を進めている各種物理・工学コードを統合するツールIMAS(Integrated Modelling Analysis Suite)の開発と、各種コードの利用状況の報告も行われた。

国際比較実験に関連しては、DIII-D(米)、KSTAR(韓)、JET(欧)等の各国のトロイダル実験装置の現状や運転計画の報告が行われた。KSTARから、高圧力の先進運転シナリオの実験結果および、その高圧力化がECHによる高エネルギーイオンの閉じ込め向上に起因するという解析結果が報告された。DIII-Dでは、ITERと同程度の小トルク入射条件でITER標準運転シナリオを模擬する実験を行うとテアリングモードが頻発する問題を、周辺部のプラズマ電流分布を調整することで回避できることが示された。

プラズマ制御手法に関しては、モデリングやシミュレーションだけでなく、実験においても進展があった。DIII-Dからは、モデル予測を用いた安全係数分布と規格化ベータ値 β_N の実時間制御等の報告があった。TCV(スイス)からは、実時間でNTMの発生をモニターし、NTM発生時にはECHパワーの一部をNTM抑制のために割り当てながら、残りの加熱源を用いて β_N の実時間制御を継続した実験結果が報告された。ITERでは多数の制御タスクを限られた加熱・電流駆動源で同時に達成する必要があり、今後とも大きく発展する領域である。

現在運転中のトカマク装置だけでなく、ダイバータ研究に主眼を置くDTT(伊)の計画の現状について報告があった。また、Wendelstein 7-X(独)からトカマク装置と共通するプラズマ電流や不純物蓄積に関わる物理モデルの検証結果等、ヘリカル装置からの報告も行われた。

輸送と閉じ込め物理トピカルグループとの合同会合では、運転シナリオの統合モデリングのためにプラズマ密度やLH遷移等のモデルが必要であることが提起され、第一原理シミュレーション結果に基づいて開発しているプラズマ輸送やペデスタルの機械学習モデルの現状について報告された。

次回会合では、国際比較実験と共同モデリング活動の進捗を重点的に議論するとともに、今までのITERに関わる検討結果をまとめるITER Physics Basisの執筆について議論を行うことになった。

(原稿受付日：2018年5月24日)