

■ITPA(国際トカマク物理活動)会合報告 (55)

分野: 「MHD安定性」¹, 「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: 2016年3月7日-11日¹, 2016年3月17日-19日², 2016年3月16日-3月18日³, 2016年4月26日-29日⁴

場所: 土岐(日本)¹, アーメダバード(インド)^{2, 3}, ガルヒン(ドイツ)⁴

担当委員:

諫山明彦(原子力機構)¹, 榊原悟(核融合研)¹, 白石淳也(原子力機構)¹, 古川勝(鳥取大)¹, 政宗貞男(京都工繊大)¹, 松永剛(原子力機構)¹, 渡邊清政(核融合研)¹, 相羽信行(原子力機構)², 浦野創(原子力機構)², 神谷健作(原子力機構)², 大山直幸(原子力機構)², 鈴木康浩(核融合研)², 中島洋輔(筑波大)², 森崎友宏(核融合研)², 本多充(原子力機構)³, 吉田麻衣子(原子力機構)³, 今澤良太(原子力機構)³, 宮戸直亮(原子力機構)³, 田中謙治(核融合研)³, 田村直樹(核融合研)³, 井戸毅(核融合研)³, 井手俊介(量研機構)⁴, 林伸彦(量研機構)⁴, 福山淳(京大)⁴, 鈴木隆博(量研機構)⁴, 花田和明(九大)⁴, 長崎百伸(京大)⁴, 藤田隆明(名大)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	2016年10月24-26日	京都(日本)
ペデスタル物理	2016年10月24-26日	那珂(日本)
輸送と閉じ込め物理	2016年10月24-26日	那珂(日本)
統合運転シナリオ	2016年10月24-27日	那珂(日本)

1. 「MHD安定性」

第27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15名、欧州6名、ロシア1名、中国5名、インド2名、ITER機構2名が参加した(人数は概数でTV会議参加を含む)。会合では、ディスラプションや誤差磁場(3次元磁場効果含む)などについて活発な議論が行われた。

逃走電子抑制に関し、逃走電子発生後に大量Neガス入射した場合と粉砕ペレット入射した場合では逃走電子の減衰率は同程度であることがDIII-Dより報告された。また、抵抗性MHDモデルと逃走電子の発展式を統合したEXTREMコードの結果が報告され、 $m/n=1/1$ モードにより逃走電子がバースト状に生成されることが逃走電子電流量が増加することが説明された(m はトロイダルモード数、 n はトロイダルモード数)。

ディスラプション予測に向けて、Alcator C-Mod, EAST, DIII-Dの大量の放電データ(各2000-3000ショット)を機械的に解析していることが報告された。例として、プラズマ電流の指令値と実績値との差のヒストグラムをディスラプションの有無で比較した例が紹介された。

誤差磁場/モードロックに関して、LHDにおいてモードロックに至る過程の磁気島構造を測定した結果、磁気島回転速度はトロイダル方向に非一様であったことが報告された。HYBTOK-IIからは、 $m/n=2/1$ の外部磁場印加時のプラズマ内磁場構造をプローブで測定した結果が報告された。また、 $m/n=2/1$ の磁気島を外部磁場により能動的に回転させる実験がDIII-Dに続きASDEX UpgradeやJ-TEXTでも行われたことや、ITERのELMコイルでモードロックを回避するシミュレーションを行ったことが報告された。

MHDシミュレーション関連では、LHDにおいて観測されるコア密度崩壊直前に現れるバルーニングモード構造が、拡張MHDコードMIPSにより再現されることが報告された。また、MSTにおける鋸歯状振動周期が、1流体MHDコードDEBSにより再現されることが報告され、拡張MHDコードNIMRODにより、RFPにおける流れの構造形成に2流体効果が重要であることが報告された。MHD理論に関連して、MHD平衡の問題に関して、擬似アニーリング法により、2次元に限らず、3次元性や流れといった本質的に困難な効果を含む平衡問題を解く統一的な理論的枠組みが示された。抵抗性壁モード(RWM)関連では、拡張MHDコードM3D-C1に抵抗性壁の効果を取り入れてベンチマークを行った結果が報告され、ハロー電流を含む垂直移動現象のモデリングへの適用について議論された。また、RWM安定性解析において重要な運動論的MHDに関して、回転の効果を含むように拡張した理論が報告されるとともに、今後の理論研究の展開について議論された。また、NSTXにおいて開発された状態空間コントローラーを用いたRWM制御研究についての報告があった。

共同実験やワーキンググループ(WG)活動では、逃走電子の発生に関する共同実験(MDC-16)および誤差磁場補正に関するWG活動(WG-9)が終了し、逃走電子の形成・抑制・緩和に関する共同実験(MDC-23)、およびプラズマ境界の3次元変形(WG-12)、不純物入射による逃走電子エネルギーの消散(WG-13)に関するWG活動が新規開始または再開されることが説明され、了承された。

2. 「ペデスタル物理」

本会合には11名(欧州2名、米国4名、ITER機構1名、日本1名、中国1名、インド2名)の参加者があり、ITERの最重要課題である(1)共鳴磁場摂動(RMP)コイルを用いたELM抑制・低減化条件、(2)Hモードペデスタル構造の理解、(3)L-HおよびH-L遷移の発生条件、(4)Iモード研究、(5)ペレット入射によるELM制御条件の各ワーキンググループの現状報告に関して討議が行われた。また、今回はITER Physics Basisの改訂に関する議論が行われた。ITER Physics Basisは2007年のNuclear Fusion誌からの発

行以来、周辺ペデスタル物理研究では上記のITER重要課題を中心として大きな進展が見られており、本年12月から約1年かけてレビュー論文として執筆を行う方針で意見がまとめられた。

Hモードペデスタル構造のワーキンググループでは、昨年秋のITPA会合で「統合運転シナリオ」トピカルグループから依頼された、ITERでのペデスタル構造予測について、ITERの運転領域に対応するペデスタルパラメータのlookupテーブルをEPEDモデルを用いて作成した。また、MHD安定性解析コードELITEを低トロイダルモード数領域までカバーできるように拡張し、QHモードプラズマ等においてペデスタル領域で低トロイダルモード数が不安定となる場合でのベンチマークを行ったという報告があった。浦野（原子力機構）からJT-60Uにおける衝突周波数のペデスタル構造への影響に関する報告があった。ITERと同程度の低衝突周波数領域では、衝突周波数に対するペデスタル幅の変化は小さいが、高トロイダルモード数のpeeling-ballooningモードが不安定となる高衝突周波数領域では、衝突周波数の増大に伴ってペデスタル幅が広がることを示した。

ASDEX Upgradeでは、Iモード実験データの系統的な整理が行われ、Alcator C-Modと同じ性質を有することを示した。閉じ込め性能はH98 ~ 1に達する場合もあるが、安定して得られるのはH98 < 0.9程度である。Alcator C-Modでは、エネルギー閉じ込め性能は入力パワーとともに少し劣化するが、一方で粒子閉じ込め性能はLモードと同程度であるという報告があった。また、Iモードの発生領域に対応する加熱パワー領域はトロイダル磁場とともに広がる傾向を示す。今後、EAST, KSTAR, TCV等で新規実験提案がされており、データベースの拡充とともに物理的理解の進展が期待される。

JETからL-H遷移に対する低Z不純物の影響について報告があった。ITER-like Wall (ILW)での実験では窒素ガス入射によってL-H遷移パワーの増大を観測した。低Z不純物による周辺乱流への影響及びSOL領域での放射損失の変化による径電場分布の変化の可能性について議論された。DIII-DからLH遷移パワーの密度依存性に関する報告があった。L-H遷移パワーは電子密度が $1 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ 以上では系統的に電子密度とともに増大する傾向がある。しかし、プラズマ電流値によって密度依存性は複雑な傾向を示し、2次元ビーム放射分光法(BES)を用いた密度揺動計測からL-H遷移時の低波長の密度揺動振幅が安全係数 q_{95} とともに増大することが分かった。

DIII-Dから、ITERに匹敵する低トルク領域でのペレット入射(90Hz)によるELM制御実験の結果が報告された。ELM周波数はペレットなしの場合に比べて約6倍増加し、これによってダイバータ板でのピーク熱流束が減少することを示した。またトロイダル回転が減少したことにより閉じ込め性能は低下したが、ペレット入射自体によってペデスタル及び閉じ込め性能を著しく変化させないことを示した。

3. 「輸送と閉じ込め物理」

第16回となる本会合には43名程度（日本2名、欧州23名、米国12名、ロシア1名、韓国3名、ITER機構2名、リモートも含む）が参加した。会合は、Hモード閉じ込めデータベース、不純物輸送、Iモード特性、L-H遷移時のプラズマ特性、自発回転、三次元磁場の影響などのセッションから構成され、各セッションにおいて活発な議論がなされた。Iモード特性、L-H遷移、三次元磁場のセッションについては、ペデスタル物理トピカルグループと合同開催であった。

ITPA調整委員会は、本トピカルグループに対して、閉じ込めデータベースを更新することを推奨している。この要請のもと、Hモード閉じ込めデータベースのセッションでは、主に次のような報告及び議論がなされた。閉じ込めスケールリング則の改訂として、SOL領域の密度と入力トルクをデータベースに入れることが提案された。前者はコア部とペデスタル部の閉じ込めの相関と、周辺部の閉じ込めと周辺の中性粒子圧力の依存性を考慮したものであり、後者は回転の閉じ込めへの効果を考慮したパラメータである。このような経験則の構築と平行して、ペデスタル部のモデルEPEDとコア部の乱流モデルTGLFの結合により、蓄積エネルギーの予測と、データベースに入れるべきパラメータの導出が試みられている。

今回の不純物輸送のセッションは、低Z不純物に焦点が置かれた。JETでは、炭素と窒素の密度は、プラズマ中心部で凹んだもしくは平坦な分布をしており、ヘリウムとベリリウムの密度は中心がピークした分布をしていることが報告された。ASDEX Upgradeでは、ボロン密度は平坦もしくは中心ピークした分布となり、ヘリウム密度は中心ピークした分布を持つことが報告された。これらの装置では、低Z不純物の輸送は新古典輸送を無視できる領域にあるが、乱流モデルGKWの予測はヘリウム、ボロン、炭素、窒素密度の順に中心ピーク度が増える傾向にあり、実験結果と逆の傾向であった。

L-H遷移のセッションでは、主にL-H遷移と乱流の変化に着目した報告がなされた。DIII-Dでは、L-H遷移直前のモード計測に加え、密度領域により重水素運転と軽水素運転でL-H遷移パワーの関係が異なることが報告された。高密度領域では、重水素運転よりも軽水素運転の方がL-H遷移パワーが大きくなるが、ある密度より低い場合は同程度であることが示された。これらの実験結果を基に、密度に依存する乱流がL-H遷移に影響していることが議論された。JETでは、乱流の相関長と同程度の波は、L-H遷移状態に近づくと消えることが報告された。L-H遷移時の密度増加をモデル化する試みも行われ、プラズマ周辺部の乱流モデルXGC1と新古典理論を用いて、セパトリクスでのL-H遷移のシミュレーションが示された。遷移のタイムスケールは、エネルギー閉じ込め時間より十分短く、乱流が飽和する時間より十分長かった。

自発回転のセッションでは、自発回転を生む残留応力のジャイロ半径依存性を調べるため、JET, DIII-D, ASDEX Upgradeの3つの装置において、規格化ベータ値、安全係

数、規格化衝突周波数を揃えた実験がなされた。DIII-Dではジャイロ半径の減少に伴い残留応力が増加することが示された。他の装置については現在解析を行っている。その他、JETでは、新古典フローの効果に着目した残留応力のモデルの検証が開始されたり、KSTARにおいては、電子サイクロトロン加熱時の残留応力の検討を進めたりしている。

理論・シミュレーション関係では、前述した実験との比較やプラズマ予測の内容に加え、モデル及びコード間の比較も行っている。準線形モデルのGLF23, TGLF, QuaLiKizは、実験で観測されている電子密度勾配の衝突周波数や電子温度対イオン温度比の依存性に加え、密度分布と温度分布について、比較的良く再現することを示した。QuaLiKizは、輸送コードJETTO-SANCOや回転に関する流体モデルとの結合と、電子温度勾配不安定性や高Z不純物のポロイダル非対称性の改訂が行われている。一方、中心部が凹んだ分布や、ベレット入射時の密度分布については、更なるモデル検証が必要である。また、閉じ込めの同位体依存性の研究も不足しており、実験装置間、実験と理論間の連携した研究が必要である。今後、ジャイロ運動論と準線型モデルのニューラルネットワークモデルの構築を行うこととした。

4. 「統合運転シナリオ」

第16回の本会合はドイツのマックスプランクプラズマ物理研究所で行われ、日本3名、欧州21名（内3名TV会議）、米国6名（内1名TV会議）、韓国2名、中国1名（TV会議）、ITER機構4名（内1名TV会議）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。今回の会合では、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と今後の新規提案計画の議論、He運転とプラズマ放電の終了シナリオ、プラズマ制御手法、粒子輸送とペデスタルならびに運転シナリオのモデリング、に重点が置かれた。それ以外に、各国装置の現状や運転計画の報告、今年のIAEA会議で発表する共同論文に関する議論があった。

ITER機構からは、ITER計画およびITER機構の組織の状況と必要な検討事項等に関して報告があった。本トピカルグループに関わる事項として、初期He運転シナリオやその他の運転シナリオ、タングステン蓄積、電流立ち下げ時の密度減衰、ペデスタルのブートストラップ電流に関する実験とモデリング等が要請された。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)の開発状

況と適用例の報告があった。各国がもつコードの特に入出力部分をIMASのデータモデルを用いるように改良し、まずグループで行っているモデリングと実験の結果の共有化をはかっていくことになる。

ITER運転シナリオに関する国際比較実験については、DIII-Dの標準運転シナリオ実験では、プラズマの安定性はペデスタル近くの $q=2$ 面のテアリングモードが決められており、プラズマの回転が遅くなるとペデスタルの圧力とともに電流が大きくなった結果、 $q=2$ 面の電流勾配が大きくなりテアリングモードが不安定化されることが示された。He運転シナリオについては、ASDEX Upgradeの実験で重水素と同程度の大きさのELMが得られ、RMPによるELM緩和も重水素と同程度にできた結果が示された。しかし、全体の閉じ込め性能とペデスタル圧力がまだ低く、加熱の増強の必要性が議論された。

運転シナリオや加熱／電流駆動、燃焼制御に関するモデリングの報告があり、それを基に議論を行った。その中で京大の福山は運動論的統合モデリングの燃焼プラズマの立ち上げへの適用結果について報告した。フォッカープランクコードTASK/FPで低温から高温までの複数種の分布関数の時間発展のシミュレーションを行い、燃料イオンの詳細な速度分布は核融合反応率にそれほど影響せず、径方向拡散のエネルギー依存性が高エネルギー粒子形成と燃焼立ち上げに強く影響することを示した。

粒子輸送のモデリングに関しては、統合コードTOPICS（量研機構）やTASK（京大）を含めて各国のコードで計算して得られたITER標準運転における燃料密度分布を比較した結果が示された。燃料イオンを解くか電子を解くかが各コードによって異なり、それぞれで用いる条件を揃えたが、一部のコードで結果がずれていた。原因を議論した結果、条件が足りなかったことが分かり、再計算することになった。

ブートストラップ電流については、量研機構の林からマトリックス反転法による評価結果が報告された。マトリックス反転法はモーメント方程式に基づき摩擦力の高次補正を考慮しペデスタルの高衝突周波数領域にも有効なモデルである。JETのペデスタル分布で評価し他のモデルと比較した結果、局所第1原理コードNEOの結果とほぼ一致しており、NEOよりもはるかに短い計算時間で妥当な結果が得られることを示した。

この他、次回会合での他グループとの合同セッションでの議題を検討し、比較実験と共同モデリングに関しての次回会合までの検討事項等を取り決め、会合を終了した。

（原稿受付日：2016年6月9日）