



■ITPA (国際トカマク物理活動) 会合報告(36)

●分野: 「高エネルギー粒子物理」¹, 「MHD 安定性」², 「ペDESTAL物理」³, 「輸送と閉じ込め物理」⁴

●開催日: 2012年3月5日-9日^{1,2}, 2012年4月2日-4日³, 2012年4月2日-5日⁴

●場所: 土岐 (日本)^{1,2}, 合肥 (中国)^{3,4}

担当委員:

篠原孝司(原子力機構)¹, 東井和夫(核融合研)¹, 藤堂泰(核融合研)¹, 長壁正樹(核融合研)¹, 濱松清隆(原子力機構)¹, 村上定義(京大)¹, 山本聡(京大)¹, 諫山明彦(原子力機構)², 榊原悟(核融合研)², 古川勝(東大)², 政宗貞男(京都工繊大)², 松永剛(原子力機構)², 山崎耕造(名大)², 渡邊清政(核融合研)², 相羽信行(原子力機構)³, 浦野創(原子力機構)³, 大山直幸(原子力機構)³, 神谷健作(原子力機構)³, 鈴木康浩(核融合研)³, 中嶋洋輔(筑波大)³, 森崎友宏(核融合研)³, 井戸村泰宏(原子力機構)⁴, 坂本宜照(原子力機構)⁴, 田中謙治(核融合研)⁴, 田村直樹(核融合研)⁴, 矢木雅敏(原子力機構)⁴, 吉田麻衣子(原子力機構)⁴

(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
高エネルギー粒子物理	2012年10月15日-17日	サンディエゴ (米国)
MHD 安定性	2012年10月15日-17日	サンディエゴ (米国)
ペDESTAL物理	2012年10月15日-17日	サンディエゴ (米国)
輸送と閉じ込め物理	2012年10月15日-18日	サンディエゴ (米国)

1. 高エネルギー粒子物理

本会合は日米MHDワークショップ, ITPA MHD 安定性トピカルグループ (以下MHD TG) との合同会合であった。高エネルギー粒子物理トピカルグループ (以下EPTG) に限定した参加者は28名 (日本より9名) であった。

アスペクト比10の円形トカマクにおける $n=6$ のTAEモードについて非線形コードのベンチマーク結果がMEGA (核融合研), HMG, TAEFL コードより報告された。同モードに対する非線形コードのベンチマークを継続するとともに, 計測が整ったAE実験を対象としたベンチマークにも線形コードと共同で取り組んでいくこととした。同モードに関する線形過程のベンチマークに関するIAEA 共同論文の内容の現状と今後の方針の議論も行い, 各コードの最近の進展が発表された。MEGA コードを用いたITER 9MA 定常運転シナリオでの解析が実施され, 高速イオンに与える影響が初めて報告された。

線形コードのベンチマーク活動については, 最新の

ITER 9MA 定常運転シナリオ用ベンチマークデータが準備された旨が報告された。加えて, LIGKA コードによる解析結果が報告された。また, 実験を元にしたベンチマークケースとして使用できるJETのDT実験のデータがITER文書システムに準備された旨が報告された。

実験の発表では, MSTのNB入射実験においてRFP装置で初めて高速イオン励起不安定性が観測されたとの報告があった。DIII-D, AUG, KSTARではRMPコイル擾乱磁場と高速イオンの相互作用が損失高速イオン計測で観測された旨が報告された。NSTXで“TAE雪崩”時に観測される中性子発生率の減少は, 高速イオンの損失というよりはむしろ高速イオンのエネルギーがTAEにわたっていることが支配的に寄与していることが, 詳細な解析で明らかになった。LHDからは最近の高速イオン励起不安定性の実験の広範にわたるレビューとEGAMに関する詳細発表があった。EGAM発生時に, 低エネルギーの中性粒子束の増加が観測されるが, バルクイオンの温度上昇として説明できることがわかった。これは, EGAMによるバルクイオン加熱の可能性を示す。HL-2AからはBAAEによる高速イオンの損失や初めて観測された周波数スペクトル分岐が報告された。共同実験 (以下JEX) はそれぞれ順調に進んでいる。揺動による高速イオン輸送に関わるJEXについてはジャイロ運動論的揺動数値計算コードによるDIII-Dの実験結果を用いたベンチマークの進捗状況が報告された。当初, 周辺NB入射を対象とする予定であったが, プラズマ回転の取り扱いの難しさから, 中心入射を対象とすることとし, 必要なデータが準備された旨報告があった。AEの非線形発展に関わるJEXではLHDとMASTで実施された実験結果が報告された。ともに非線形発展のキーパラメータであるアルヴェンエネルギーとイオンドラッグエネルギーの比のスキャンが実施された。HL-2AにおいてもBAAEの非線形発展が観測されており, HL-2Aも本JEXに参加することとなった。ELMや周辺部摂動磁場と高速イオン輸送の相互作用に関わるJEXについてはAUGとDIII-DからRMPコイルの磁場による高速イオンの輸送の観測結果が報告され, 間近の実験計画が議論された。RMPコイルを有するKSTARも本JEXに参加することとなった。

高速イオン計測器については, ITERにおいて損失高速イオンの計測がまったく準備されていないことが指摘され, その対応が議論された。自己燃焼プラズマの理解において高速イオン研究は重要であり, 損失高速イオン計測の設置が必須であるという共通認識に至った。その旨をIOに強く伝えることとした。

テスト粒子を用いた高速イオン閉じ込め評価では, DRIFTコードを用いたITERのELM制御コイルの影響評価の報告があった。ASCOTコードでNTMやAEと高速イ

オンの相互作用を扱えるようになった旨の報告があった。OFMC コード（原子力機構）の全軌道追跡拡張版の報告があり、ITER のリップル磁場環境下では全軌道追跡と案内中心の差は、誤差の範囲であるという結果であった。

MHD TG との合同セッションでは、主にディスラプション回避法と逃走電子関連の発表が行われた。ITER の現時点の課題と共に逃走電子の最近の実験結果と数値計算結果が報告された。一方、高速電子の研究を EP TG のスコープから外すことが議論され、外す方向で進めることとなった。

2. 「MHD 安定性」

改組後第 8 回となる本会合は、核融合科学研究所において日米 MHD ワークショップおよび高エネルギー粒子トピカルグループ会合と合同で開催された。参加者は遠隔参加を含め、日本 44 名、EU 16 名、米国 22 名、ロシア 4 名、インド 1 名、韓国 5 名、中国 4 名、ITER 機構 5 名であった。会合では、ディスラプション、誤差磁場、鋸歯状振動、新古典テアリングモード (NTM)、抵抗性壁モード (RWM) などに関する共同実験およびワーキンググループ活動の報告・審議が行われた。今回は上記研究領域における 3 次元効果が特に注目され、多くの発表があった。

ディスラプションに関しては、熱クエンチ時の放射損失のトロイダル方向非対称性の緩和、逃走電子の抑制・制御、ハロー電流のモデリングに関する報告があった。Alcator C-Mod からはトロイダル位置でほぼ 180 度離れた位置に 2 系統目のガス注入口を設置した結果が報告され、2 箇所からはほぼ同時にガス注入したときにクエンチ直前の放射損失のトロイダル非対称性が減少することが示された。また、ハロー電流のモデリングに関連して、DINA と TSC においてプラズマ抵抗の定義式やブランケットの電流減衰時定数を合わせて比較し、両コードでプラズマ電流やプラズマ位置の時間発展がよく合うとの結果が報告された。さらに、ハロー領域においてシースモデルを導入することにより、ASDEX Upgrade の実験結果をよりよく再現できることが示された。

RWM に関しては、プラズマの運動論的効果を考慮した安定性解析コード MISC (米 Columbia 大) と MARS-K (英 CCFE) の Solov'ev 解析平衡と ITER の平衡を用いたベンチマークの進展について報告があった。高規格化ベータ値実験で観測された高エネルギーイオン駆動不安定性と RWM または ELM との相互作用に関する実験報告が JT-60U と DIII-D からなされ、ELM 誘発の可能性として高エネルギーイオンの周辺への輸送が考えられることが示された。ITER に向けた RWM の帰還制御に関して、帰還制御に使用する磁気センサへのノイズの評価、ノイズが動的誤差磁場補正へ与える影響、RWM 帰還制御時に誤差磁場補正コイルに発生する電流の評価について報告された。また、ITER で補正すべき誤差磁場許容値の評価について報告があり、有理面における共鳴成分だけでなく、非共鳴成分についても考慮し、局所的な補正をすることが好ましいことが示された。

MHD 平衡・安定性に対する 3 次元効果についての発表は、主に日米 MHD ワークショップとの合同セッションで行われた。「共鳴摂動磁場の MHD 平衡・安定性に対する影響」に関連した課題として、外部共鳴摂動磁場のプラズマへの「浸み込み」について、従来トカマクで発展してきた理論をヘリカル磁場に適用しその拡張性を示すことにより、従来の理論の妥当性を検証する発表がある一方、最近の LHD 実験解析から、磁気丘や磁気井戸のような磁場特性の重要性を示唆する結果に関する発表があり、環状系プラズマの MHD 特性に対する統一的な理解には今後磁場配位を超えた議論や研究が必要なが確認された。また、RFP で最近精力的に研究が進められている単一ヘリシティ状態に関しては、3 次元 full-MHD シミュレーションによる準定常状態の再現やトカマクで観測される「スネーク」配位との関連でプラズマ自身が作る共鳴磁場により準安定化状態の形成の可能性についての発表があった。さらに、上記の現象を説明するのに不可欠な 3 次元磁場効果の影響を精度よく評価するために、従来の磁場揺動計測だけでなく、静電ポテンシャルや電子の動的熱輸送特性を利用した磁場構造や電磁トルクの計測手法に関する研究の進展に関しての報告があった。

共同実験は現在 10 の研究課題が進められている。いずれの研究課題も継続されることになった。また、ワーキンググループは現在 4 つの研究課題が進行中である。そのうち 3 つは今年の秋にレポートを提出する予定である。また、locked mode 制御、プラズマ境界の 3 次元変形に関するワーキンググループ活動が提案された。

3. 「ペDESTAL 物理」

本会合には 39 名 (欧: 8, 米: 8, ITER 機構: 3, 日: 4, 中: 11, 韓: 5) の参加者があった。ペDESTAL 構造形成、ELM の物理とモデリング、ELM 間におけるペDESTAL の時間発展特性、RMP やペレットを用いた ELM 制御、L-H 遷移物理等のセッションにおいて、各装置での最新の実験結果と国際装置間比較実験に関する討議が行われた。本グループの議長は今回より大山氏 (原子力機構) が 3 年間の任期で務める。また、核融合エネルギーフォーラム物理クラスターからの推薦に基づき、担当委員が北島氏 (東北大) から鈴木氏 (核融合研) に交代した。

高時間・空間分解の計測器を用いた ELM 間 (inter-ELM フェイズ) におけるペDESTAL 部の密度、温度、電流、電場等の主要パラメータの時間発展の詳細について JT-60U を始め 8 装置から報告があった。特に、ASDEX Upgrade における電子温度の ELM 崩壊直後からの回復フェイズにおける複雑な振る舞いの観測が注目された。それに対して電子密度は比較的単純な回復過程であるとともに電子温度の回復よりも早い。ペDESTAL 部の密度の回復が温度の回復よりも早い点については JT-60U の観測結果と同じである。周辺プラズマ圧力の複雑な回復過程は周辺部ブートストラップ電流および径電場の構造形成に影響することから、ELM を決定する安定性や輸送特性にとって重要であり、周辺プラズマ圧力の回復と周辺揺動の関係を含めた装

置間比較を継続することになった。

輸送と閉じ込めトピカルグループと合同で開催したL-H遷移に関するセッションでは7件の発表があり、EASTからditheringフェイズにおけるポテンシャル(電場)揺動特性が報告され、L-H遷移およびH-L逆遷移のダイナミクスに関して“microscopic”的現象に注目した議論が行われた。またJETにおけるITER-like wall(タングステンダイバータおよびベリリウム第一壁)実験の初期解析結果として、L-H遷移閾パワーが炭素壁より減少するとともに、低密度領域でL-H遷移閾パワーが上昇する(L-H遷移閾パワーが最低になる密度が存在する)ことが報告された。

RMPコイルを用いたELM熱負荷の低減化については、DIII-Dから外部コイルによるELM低減化時における密度分布の変化についての報告があった。プラズマコア部における密度スケール長は増加するが、ペDESTAL部では密度スケール長が増加することが示されるとともに、輸送解析および揺動計測とシアフローとの相関に関する考察が報告され、RMPによって $E \times B$ シアフローが減少することが示唆されたが因果関係は不明である。また、HINT2コードを用いたRMPコイル印加時のDIII-Dプラズマの3次元MHD平衡解析の状況について鈴木(核融合研)から報告があり、今後の進展が期待された。ASDEX Upgradeからは、装置の内部コイルが16個に増強されトロイダルモード数(n)が4の摂動磁場での実験が可能になったがELM低減はまだ成功していないこと、 $n=1$ と2であればELM低減が可能であることが報告された。MASTもコイルを増強し、上側6個、下側12個のコイルを複数の組み合わせで実験を行い、 $n=3, 4, 6$ でELM低減が可能であること、 $n=6$ であればL-H遷移閾パワーへの影響がないことが報告された。KSTARからは $n=1$ コイルによるELMサイズの低減の実証結果が報告され、ECEイメージングおよびRFプローブによるフィラメント構造(バースト)の励起に関する興味深い観測結果があった。

ペレット入射によるELMベースメーカーキングでは、DIII-Dに設置された新しいペレット入射装置によって、自然に発生するELM周波数の10倍程度である60 Hzのペレット入射によってELM熱負荷を大幅に低減できることが報告された。プラズマ周辺部への局所電子加熱では、TCVにおいて加熱パワーを変調した電子サイクロトロン加熱(ECH)実験の結果が報告され、ECHパワーのオンオフに同期してELMを発生させることが可能であるものの、自然に発生するELM周波数以上に変調周波数を上げることができないことが確認された。この結果から、JT-60Uと同様に連続発振のECHによるELM低減の最適化が必要との認識を得た。一連の実験結果を基にした理論・モデリングの開発も進んでおり、ELM発生時の非線形発展をシミュレートするコードと実験結果のベンチマーク活動を始めることで合意した。

4. 輸送と閉じ込め物理

本会合(第8回)は、ペDESTALトピカルグループと合同で開催された。62名(日本2名、欧州6名、米国8名、ロ

シア3名、インド1名、中国41名、ITER機構1名)が出席した。

オープニングセッションの後、運動量輸送とプラズマ回転、L-H遷移条件と物理機構、IAEA会議のグループ論文の内容に関する議論、乱流輸送、粒子輸送と供給、3次元磁場のプラズマ閉じ込めへの影響、ITER予測に向けた装置間比較実験のセッションが設けられ、それぞれの報告および議論がなされた。

運動量輸送とプラズマ回転のセッションでは、JT-60U、EAST、HL-2A、KSTAR、NSTXでの個々の結果に加え、装置間比較実験から3件、理論から2件の合計10件の報告があった。JT-60Uにおいて、電子サイクロトロン波加熱(ECH)時に、プラズマ電流と逆方向の自発回転が発生することと運動量輸送係数が増加することが吉田(原子力機構)から報告された。EASTでは、オーミック加熱のプラズマにおいて、LHCDを入射しそのパワーを増加させると自発回転の方向がプラズマ電流と逆方向から順方向に変わる現象が観測された。装置間比較実験として進めている残留応力(自発回転の駆動源)のスケーリングでは、JETやJT-60U等のデータが新たに加えられ、経験則との比較が行われた。理論からは、プラズマ中の乱流が運動量フラックスを生じさせることが予測されており、この現象はプラズマ周辺部だけではなくコア部にも存在しうること、そして内部輸送障壁の閾値パワーに影響することが報告された。

IAEA会議のグループ論文に関するセッションでは、閉じ込めのベータ値依存性、モデリングの検証、L-H遷移パワースケーリング、運動量輸送係数の衝突周波数スケーリングについて、中間報告と議論がなされた。本件に関する議論は、最終日のブレイクセッションでも継続された。

粒子輸送と供給のセッションは、ペDESTALトピカルグループと合同で開催された。密度勾配は規格化衝突周波数の減少と伴に増加する傾向が、ASDEX Upgrade、C-Mod、JET、JT-60U等の装置で観測されているが、JETではこの密度勾配と規格化衝突周波数の関係が重水素プラズマだけではなくヘリウムプラズマにおいても観測された。ASDEX Upgradeではイオン温度勾配モードが不安定な領域から捕捉電子モードが不安定な領域に移行する領域において、最も密度勾配が大きくなることを示し、これはジャイロ運動論を用いたシミュレーション結果と矛盾しないことが報告された。一方、DIII-Dでは、規格化衝突周波数以外の無次元量を固定した状態で規格化衝突周波数をスキャンしたところ、衝突周波数が高い場合も低い場合も密度分布が同じであったことが示され、その違いの解釈や乱流計測などの研究が必要であることが議論された。

3次元磁場のセッションも、ペDESTALトピカルグループと合同で開催された。まず、ステラレータとトカマクでの結果に関するオーバービューが話され、その後、個々の装置での最近の結果が報告された。DIII-DではRMP印加時にペDESTALの密度と幅の両方が減少していることが観測された。この時、BESで計測した密度揺動が増加しているため、乱流的な粒子輸送が生じているという解釈であっ

た。一方、ASDEX Upgrade では、B コイルを印加すると時間遅れを持ってペダスタル部の電子密度が上昇することが示された。これは、Type-I ELM が抑制されることで粒子閉じこめが良くなったと提言された。LHD では乱流揺動計測により、ELM free の遷移は自発的に起こり、遷移後密度が上昇し、乱流揺動が減少することが田中（核融合研）から報告された。また、ジャイロ運動論コードを用いた線形計算により、H モード遷移後に捕捉電子不安定性が衝突周波数の増加により安定化することが示された。さらに、 $n = 1$ の RMP による ELM の振幅の減少と繰り返し周波数の増加が観測され、ELM 制御の可能性が示されたことが東井（核

融合研）から報告された。なお、RMP 印加によりエネルギー閉じ込めに大きな劣化がみられていないことも報告された。3次元磁場のセッションは ITPA の正式なタスクと認知され、今後2年間の研究を含めた成果を2014年の IAEA 会議で報告することを目標とすることになった。

装置間比較実験のセッションでは、前述の IAEA 会議のグループ論文に加え、全部で11件の報告があった。主な内容は、 $H_{\text{H}} \sim 1$ 近辺での輸送特性、L-H 遷移の密度依存性、I モードでの輸送特性と乱流計測、コア部と周辺部の境界領域 ($r/a \sim 0.6 - 0.9$) での輸送特性、ヘリウム等不純物輸送特性、温度分布の硬直性の進展と結果が報告された。