

■ ITPA (国際トカマク物理活動) 会合報告(42)

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

●開催日: 2013年9月22日-24日¹, 2013年10月7日-9日^{2,3}, 2013年10月7日-10日⁴, 2013年10月8日-11日⁵

●場所: 北京(中国)¹, 春日(日本)²⁻⁴, 合肥(中国)⁵

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, Andreas Bierwage(原子力機構)¹, 村上定義(京大)¹, 山本聡(京大)¹, 吉田麻衣子(原子力機構)², 田中謙治(核融合研)², 本多充(原子力機構)², 田村直樹(核融合研)², 井戸毅(核融合研)², 坂本宜照(原子力機構)², 宮戸直亮(原子力機構)², 神谷健作(原子力機構)³, 森崎友宏(核融合研)³, 浦野創(原子力機構)³, 相羽信行(原子力機構)³, 鈴木康浩(核融合研)³, 中嶋洋輔(筑波大)³, 大山直幸(原子力機構)³, 林伸彦(原子力機構)⁴, 花田和明(九大)⁴, 福山淳(京大)⁴, 井手俊介(原子力機構)⁴, 長崎百伸(京大)⁴, 中村祐司(京大)⁴, 鈴木隆博(原子力機構)⁴, 諫山明彦(原子力機構)⁵, 柳原悟(核融合研)⁵, 古川勝(鳥取大)⁵, 政宗貞男(京都工繊大)⁵, 山崎耕造(名大)⁵, 渡邊清政(核融合研)⁵, 松永剛(原子力機構)⁵

(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
MHD安定性	2014年3月10日-14日	土岐(日本)
輸送と閉じ込め物理	未定	ケンブリッジ(米国)
統合運転シナリオ	2014年3月31日-4月3日	ケンブリッジ(米国)
高エネルギー粒子物理	2014年4月第一週で調整中	マドリッド(スペイン)
ペDESTAL物理	2014年5月12-14日(調整中)	プラハ(チェコ共和国)

1. 「高エネルギー粒子物理」

本会合は第11回となり, 参加者は約30名, 28件の発表があった。「第13回磁気閉じ込め系における高速粒子に関するIAEA技術会合」の直後に実施されたため, ITPA会合では「IAEA技術会合」の内容も最新報告の一部と見なし, 主に補完的な発表と議論がなされた。

まず, 共同実験では, 局在化したアルヴェン固有モード(AE)による高速イオンの損失と再分布を扱うEP-2については, 終了するにあたっての成果の取りまとめについての議論と今後の後継となる共同研究についての議論を行った。EP-2の活動では単一モードのみを取り扱っていたため, 後継では複数モードを取り扱う活動が提案された。次回までにより具体的な案を検討することとなった。EP-4で扱っているAEの非線形時間発展についてLHDより最新の解析結果が報告されたが, 他の装置の報告も含め当初の理論的予測で容易に説明できない。EP-4では今後実験の解析に加え, 理論的な再考察を行うこととなった。EP-6で扱っている共鳴磁場摂動(RMP)コイルの影響については

DIII-DのLモードプラズマにおいてプラズマレスポンスを考慮した摂動磁場浸透コードに基づき計算された高速イオン損失と損失高速イオンプローブによる実験計測の比較が実施された。その結果, 真空磁場との差は小さく, いずれも誤差の範囲で実験をよく再現したことが報告された。ASDEX UpgradeではHモードプラズマについてモデル磁場の評価が開始された。電子サイクロトロン加熱(ECH)によるAEの制御を扱うEP-7について多数の装置よりECHによるAEのコントロールの報告があった。直接の報告ではないが, 取りまとめ担当者がIAEA会議で報告されたヘリオトロンJでの成果も取り入れて報告した。

実験ではLHDより高速イオンに駆動されたとみられる交換型不安定性(EIC)発見の報告があった。速い周波数掃引がみられることや垂直ビームの歳差周波数と不安定性の周波性が近いといった特性はJT-60Uで観測された高エネルギー粒子が駆動する抵抗性壁モード(EWM)とよく似ている。このEICによる高速イオンの輸送も報告された。

線形コードのベンチマーク活動は, トロイダルモード数 $n=6$ のベンチマークケース, ITERの15MAシナリオの安定性解析, JET DT実験のシナリオ作成を指向した安定性解析を実施しており, これらの現状のレビューと進め方について議論した。ITERとJET DT実験の解析を優先的に進めることを確認した。ITERの安全係数(q)分布の取り扱いの不整合が指摘され注意が促された。

非線形コードのベンチマーク活動では, 不安定性飽和過程の理解を目的とした高速粒子位相空間解析の報告がBriguglio氏よりあった。またKoenis氏より飽和過程で適切な減衰率の考慮が重要であることが報告された。

数値シミュレーション関連の報告のハイライトは, 高速イオン源と衝突を導入した核融合研のMEGAコードがDIII-DのAE実験をよく再現したことである。特に不安定性の形状と位相関係について, 計算と実験の非常に一致が見られた。これによりMEGAコードの妥当性が確認された。加えて, 高速イオン源と衝突を導入したJT-60Uの計算では, 入射エネルギーの粒子を連続的に駆動源とする不安定性が観測された。特徴的な速度分布関数の形状を維持しており, 本手法で初めて発見された現象のため参加者の興味を引いた。

2. 「輸送と閉じ込め物理」

本会合(第11回)では, 統合運転シナリオトピカルグループとペDESTAL物理トピカルグループとのパラレル合同セッション(3セッション)の他7セッション, 3日間の日程で開催された。セッションは, L-H遷移, プラズマ回転, 乱流輸送, 3次元磁場, 輸送モデル検証, 多種イオン効果, 分布の硬直性, 統合モデルに向けたペDESTAL/熱輸送/粒子輸送と供給であり, プラズマ回転と3次元磁場のセッションにおいては日本の委員が議長を務めた。参加者数は36名(日本5名, 欧州11名, 米国11名, 中国5名, インド1名, 韓国3名), 発表件数は43件であった(パラレル合同セッションを含む)。

L-H遷移のセッションでは, DIII-Dではプラズマ周辺で

の密度揺動が減少し L-H 遷移が起きる直前に、密度揺動と残留応力とフローシアの増大が観測され、乱流のエネルギーがシアフローを作り L-H 遷移がおくと解釈がなされた。また、幾つかのコードを用いた L-H 遷移にいたるまでの I-phase の乱流と輸送障壁のシミュレーションが報告された。

プラズマ回転のセッションでは、自発回転が変化する方向は装置や加熱方法に依らず、安全係数の分布に依存していることが示された。ASDEX Upgrade では、自発回転を駆動するトルクが周辺部に局所的に存在しベダスタルの高さに依存することが示された。Tore Supra では、LHCD を切るとプラズマ電流と同方向の自発回転が減少し、その時間スケールは 200 ms 程度でエネルギー閉じ込め時間と同程度であると報告された。QuaLiKiz モデルで評価された運動量輸送係数と、実験及びジャイロ運動論コードとの比較がなされた。また、ECH により内部キンクモードが不安定になると、新古典トロイダル粘性が回転を減少させるという KSTAR の計算結果が示された。

3次元磁場のセッションでは、磁場構造の同定、3次元磁場の帯状流への影響、RMP 印加の輸送と乱流駆動への影響、について報告があった。LHD において ECH ヒートパルス伝搬実験により、RMP 印加時の磁気島とストキャスティックの遷移を検証した。DIII-D では RMP 印加直後に密度の吐き出しと乱流揺動の増加が観測され、その後時間遅れをもって $E \times B$ シアが変化することが報告された。これは、RMP 印加による $E \times B$ シアの変化は輸送と揺動の変化の原因でなく結果であることを示唆している。

ジャイロ運動論コードは、L モード放電における周辺部の熱拡散係数を過小評価する傾向にある（輸送の不足 / shortfall）。今回はこの課題に焦点を当てたセッションが設けられた。GKV コードを用いた JT-60U の L モード放電を対象とした解析では、規格化半径で 0.5 までのイオンの熱拡散係数がある程度再現するが、より周辺部では shortfall が現れることが示された。TGLF モデルは、JT-60U ではイオン熱拡散係数を過小評価する傾向にあるのに対し、DIII-D と ASDEX Upgrade では電子の熱拡散係数が低く見積もられることが報告された。

統合運転シナリオトピカルグループとベダスタル物理トピカルグループとの平行合同セッションでは、ITER において ELM 緩和用の RMP 印加による密度減少を補うペレットによる粒子補給シミュレーション結果について報告があった。

今回は大型台風の接近により会場までのアクセスと会議の続行が危ぶまれたが、事務局によるバスの手配や天候及び交通機関の情報収集のお陰で、全てのセッションを消化し無事会合を終えることができた。

3. 「ベダスタル物理」

本会合には 35 名（欧州 6 名、米国 6 名、中国 11 名、日本 4 名、ITER 機構 1 名、韓国 3 名）の参加者があった。ITER 用 RMP コイルによる周辺局在モード (ELM) 制御物理、ベダスタル構造、ELM の物理と周辺部安定性、ベダスタル部における乱流、LH 遷移、ペレットによる燃料補給と

ELM 制御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。

RMP コイルを用いた ELM 制御については、ITER 用 RMP コイルのプロトタイプの開發現状と $Q = 10$ での運転における閉じ込め特性や非接触ダイバータ、ペレット入射との共存性について議論が行われた。また、DIII-D、MAST、KSTAR の最新の実験結果と、非線形 MHD シミュレーションコードや kinetic コードを用いた ELM 安定化機構の研究結果が報告された。

ベダスタル構造形成のセッションでは、JET 装置から金属壁（タンゲステンダイバータ+ベリリウム第一壁）における窒素不純物入射のベダスタル構造に与える影響について、線形 MHD 安定性解析結果と比較した報告があり、高三角度配位により高密度領域における閉じ込め劣化が回避できる可能性が示された。また、DIII-D からはベダスタル構造予測モデルである EPED モデルを用いた QH モードおよび I モードに関する安定性評価が報告された。さらに、ASDEX Upgrade からは窒素ガス入射およびペレットによる粒子補給（重水素）のベダスタル構造への影響評価と、新古典論にもとづく周辺圧力勾配の測定値から評価した周辺電流分布について報告があった。

ELM 物理と周辺部安定性のセッションでは、非線形 MHD シミュレーションコード (JOREK や BOUT++) を用いて ASDEX Upgrade, EAST, MAST 等の ELM ダイナミクスを研究し ELM のフィラメント構造と比較した結果が報告された。

ベダスタル部における乱流構造研究のセッションでは、EAST からダイヤモンドコーティングヘッドを用いたレシプロプローブ計測および多チャンネル反射計による詳細な乱流輸送解析結果が報告された。EAST では低衝突頻度領域から高衝突頻度領域にかけて H モード中に粒子輸送の増加と関係づけられる種々のコヒーレントモード（数 10 ~ 数 100 kHz の周波数帯）が観測されており、詳細なトロイダルモード解析結果と他装置で観測されているコヒーレントモードとの比較も報告された。

最後に、最近の装置間比較実験の進展状況の報告と新しい装置間比較実験および装置間合同活動の提案等がなされた。金属壁 / ダイバータの装置では、低 Z 不純物入射によってベダスタル圧力の増加が観測される場合があるが、その物理についてはよくわかっていない。そこで ASDEX Upgrade, JET, DIII-D 等での装置間比較実験を行い、同時に EAST, KSTAR, MAST, NSTX, Alcator C-Mod, COMPASS, JT-60U 等の装置から H モードベダスタルに対する低 Z 不純物の影響に関する実験データ提供を行う装置間合同活動について議論された。

4. 「統合運転シナリオ」

第 11 回の本会合には、日本 4 名、欧州 11 名、米国 5 名、韓国 4 名、中国 3 名、ITER 機構 3 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を提案することが主な役割である。会合の主要な内容は、グループから提

案している国際比較実験（ITER 標準・定常運転シナリオの開発、加熱／電流駆動手法の開発、プラズマ複合制御の開発等）の進展の確認と今後の展開に関する議論、ITER の運転シナリオやアクチュエータ等による加熱／電流駆動／トロイダル回転駆動、プラズマ複合制御に関するモデリング活動の現状の報告と今後の活動に関する議論であった。また、各国装置の現状や運転計画の報告も行われた。

本会合は輸送閉じ込めの物理とペDESTAL物理のトピカルグループとの同時開催であり、統合モデリングでのペDESTAL、熱輸送、粒子・不純物輸送の評価に関する3つの合同セッションがあった。ペDESTALに関しては、ペDESTALの圧力と幅の評価に使われるEPEDモデルをそのまま統合計算に使うのは計算時間がかかり現実的でないので、あらかじめ計算してテーブル化したデータを使う方法が示された。熱輸送に関しては、電流立ち上げ時の輸送モデルに関する議論や乱流輸送モデルに関する議論が行われた。不純物輸送に関しては、新古典・異常輸送が詳細に解析され、ITER プラズマであればまず新古典輸送を考慮すれば十分であることが示された。

ITER 機構からは、ITER 計画の進展、建設と運転のスケジュールおよび研究計画の改訂等に関して報告があった。統合運転シナリオに関わる検討事項として、特にタングステン等の高Z材料のダイバータを使う場合の運転シナリオ(H/He/Dや低磁場運転も含めて)および、それらの制御に関する調査・検討を要請されている。また、これらを調査・検討するためのモデリング・統合モデリングの必要項目も示された。

国際比較実験を含めた各装置の実験の現状と今後の実験予定に関して報告があった。ASDEX Upgradeからは、窒素入射実験とベレット入射実験、およびITER 模擬実験の結果が報告された。これまでの実験では、窒素を入射することで炉心の閉じ込めが改善されELMが小さくなっていたが、ITER 模擬実験ではELMは変化しなかった。また、タングステン壁では、ELM発生直後はベレットでELMを誘起できなかった(炭素壁では誘起できていた)。JETのITER 模擬実験では、タングステン壁では高三角度にしても高密度で閉じ込めは改善せず(炭素壁の場合は改善した)、窒素を入射すれば改善する結果が報告された。

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。今回は特に、ITER 機構から不純物を考慮した運転シナリオの検討が要請されていることもあり、炉心-スクレイプオフ層-ダイバータ-不純物の全てを考慮した統合モデリングの重要性が議論されていた。その中で、林(原子力機構)は、ITERにおけるベレットによるELM制御に関する統合シミュレーションの結果について報告した。プラズマ密度やプラズマ性能にできるだけ影響しないでELMエネルギー損失を大きく低減できるELM制御に適したベレットの入射条件を明らかにした。この結果はITERのELM制御用ベレットの設計に物理的指針を与えるものである。

この他、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や、来年度のIAEA核融合エネルギー会議

で発表する論文等を取り決め、会合を終了した。

5. 「MHD 安定性」

改組後第11回(通算第22回)となる本会合は、日本1名、中国30名、米国8名、欧州5名、インド2名、ロシア1名、韓国1名、ITER 機構3名の参加のもとで開催され(人数は概数でTV会議参加を含む)、ディスラプション、誤差磁場、新古典テアリングモード(NTM)、抵抗性壁モード(RWM)、鋸歯状振動などの報告が行われた。

会合ではまず、ITER 機構の委員より、ITER の最新スケジュール、プラズマ制御のための使用電力波形の評価結果、 $n=2$ の誤差磁場の評価結果(‘ $n=1$ の場合の約半分’)などが示された。

ディスラプションに関連して、DIII-Dで大量ガスパフ(MGI)用のバルブを新たに設置して実験を行った初期結果が報告された。また、放射損失のトロイダル方向非対称性が $m/n=1/1$ の不安定性(m はポロイダルモード数)と関連があるとのNIMRODの計算結果を検証するため、外部摂動磁場を回転させた結果、放射損失が大きくなる場所が移動したとの報告があった。ASDEX Upgradeからは、ディスラプション緩和が遅れた場合などを想定し、MGIのタイミングを電流クエンチ時まで遅らせて入射した結果として、電子密度としては通常入射の場合の70%程度まで上昇することが報告された。

NTMに関しては、DIII-Dの実時間NTM安定化システムにおいて、実時間でトムソン散乱計測電子温度・密度計測およびレイトレイシング計算の機能が追加されたとの報告があった。また、HL-2AとKSTARより、電子サイクロトロン放射イメージング装置や電子サイクロトロン波ミラー駆動を使った実時間システムを構築しているとの報告があった。

RWMに関しては、運動論的効果を入れた安定性解析コードのベンチマークの結果が報告された。ITERパラメータでのMARS-KおよびMISKの結果については、有理面での計算方法を合わせることによりよく一致するようになったとの報告があった。

鋸歯状振動に関しては、ITERの場合と同様に弱磁場側吸収でイオンサイクロトロン加熱を行い、鋸歯状振動周期を制御した結果がJETから報告された。また、電子サイクロトロン電流駆動による鋸歯状振動周期の伸長の結果がKSTARより報告された。

外部摂動磁場を印加したときのプラズマ境界の3次元の変動に関して5つの装置で比較した結果の報告があり、ITERでは $0.02a$ 程度(a は小半径)の変動が予測されるとの報告があった。

国際共同実験は5件が進行中であったが、うち1件が終了することが確認された。また、誤差磁場制御、鋸歯状振動制御、RWM制御、ディスラプション予測に関する研究課題4件が新たに立ち上げられることになった。

ワーキンググループ活動は6件が進行中であったが、うち3件が終了することが確認された。また、ハロー電流に関する研究課題1件が新たに立ち上げられることになった。