



インフォメーション

■ITPA (国際トカマク物理活動) 会合報告(52)

- 分野: 「高エネルギー粒子物理」¹, 「統合運転シナリオ」², 「MHD 安定性」³, 「輸送と閉じ込め物理」⁴, 「ベデスタル物理」⁵
- 開催日: 2015年9月7日-9月9日¹, 2015年10月12日-10月15日², 2015年10月19日-10月21日³, 2015年10月22日-10月23日^{4,5}
- 場所: ウィーン (オーストリア)¹, 合肥 (中国)², ナポリ (イタリア)³, ガルヒン (ドイツ)^{4,5}

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

(下線は当該グループの会合への出席者を, 1から5の上付き数字はグループとの対応を示す)

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	2016年6月27日-29日	サン・ポール・レ・デュランス(仏)
統合運転シナリオ	2016年4月12日-15日	ガルヒン(ドイツ)
MHD 安定性	2016年3月7日-11日	土岐(日本)
輸送と閉じ込め物理	2016年3月16日-18日	アフマダバード(インド)
ベデスタル物理	2016年3月16日-18日	アフマダバード(インド)

1. 「高エネルギー粒子物理」

本会合は第15回となり, 参加者は約30名, 25件の発表があった。

はじめに, 高エネルギー粒子物理に関わる課題, 及び, 前回の会議でのアクションアイテムの確認が行われた。現在活動中の共同実験は2つである。ELM制御コイル磁場擾乱中の高速イオン閉じ込め及びELMと高速イオンの相互作用を扱うEP6では, ASDEX-Upgrade(AUG),

DIII-D, KSTAR からの報告があった。AUGでは, 共鳴磁場摂動(RMP)モジュレーション実験の高速イオン損失検出器(FILD)の観測結果を真空磁場近似のモデルでうまく説明できた旨報告された。KSTARからは, プラズマのトロイダル回転とFILDでの信号強度(損失量)に線形の相関があることが報告された。

ECHによる負磁気シアアルヴェン固有モード(RSAE)の制御に関するEP7については, これまでDIII-D, AUGで様々なパラメータスキャンが実施されたが, 一見矛盾する結果が得られていた。しかしながら, ベータ値あるいは電子温度に着目すると, これらが高い時にRSAEが安定化されていることがわかった。この観点でTAEFLコードにて安定性解析を行った結果, 実験に該当するパラメータでは, RSAEに似た構造のモードは存在するが, 周波数掃引を引き起こすRSAEは存在しないことがわかった。ECHによるRSAE抑制/励起においてベータ値あるいは電子温度が重要な役割を担っていることがわかったことから, 共同実験としては終了することとした。重要な機構がベータ値なのか電子温度なのかということより詳細な物理機構については, 今後数値計算で調査することとなる。また, 新たに3つの共同実験(EP8-10)が立ち上げられた。EP8は揺動や不安定性があるときの中性粒子ビームによる電流駆動の理解をめざす。EP9はイオンサイクロトロン放射(ICE)計測の理解を深め, モデルを検証することを目的とする。EP10は定常運転シナリオでのプラズマ性能における安全係数最小値(q_{\min})依存性をAEからの影響という観点で調査するものである。プラズマ性能における q_{\min} 依存性が未解決物理となっている統合運転シナリオトピカルグループからの提案に基づくものである。加えて, AEに絡む実験の報告としては, COMPASSで高速イオンが存在しない条件でAEが観測され, 高速電子が絡んでいるのではないかという報告があった。

AEコードのベンチマーク活動については, MEGAコードの成果として, 新しく用意されたITERの15MAシナリオの解析結果に関する報告があった。前回の会合において, AEが不安定となるトロイダルモード数の範囲がいくつかの線形コードで示されていたが, この結果が今回MEGAコードでも確認され, 前回の会合でいくつかの線形コードで示されたトロイダルモード数のAEが不安定であることが確認され, 今後より詳細な解析を進める旨報告された。非線形コードのベンチマークではCKA-EUTERPEコードの進展として有限ラーマ半径効果の影響が示された。また, 非線形コードのベンチマークの新たな課題が提案された。加えて, 数値計算コードの進展として, JT-60Uで観測された約100msの長時間のタイムスケールの複合的な非線形時間発展をMEGAコードで再現できたという報告があった。また, 高速イオンの軌道面が磁気面からず

れていることを考慮した適切な共鳴条件を判断する手法が MEGA コードでの数値計算結果を例に紹介された。

ITER における適切な損失アルファ計測の抽出が課題であるが、FIELD 計測、壁と衝突による γ 線計測の報告があった。特に FIELD 計測については、詳細な熱負荷、測定可能なピッチ角とエネルギーの評価結果が報告され、実現可能な駆動型のシステムが示された。これまでの実績や得られる物理情報の多さから当トピカルグループでは FIELD 計測を強く推奨することとした。

また、AE 安定性解析では高速イオン分布の微分が重要である。そのため安定性解析ができるように NBI と ICRF が作り出す高速イオン分布を計算する活動を開始したが、それぞれの準備状況が報告された。EU は、該当コードのベンチマークを EUROfusion のタスクフォースで実施しており、今後の活動に迅速に対応できるという印象を得た。新たなモデリング活動として確率的輸送モデルの評価に関するものと不安定性があるときの NB 電流駆動に関するものが提案された。

2. 「統合運転シナリオ」

第15回の本会合は中国科学院プラズマ物理研究所で行われ、日本3名、欧州8名、米国5名、韓国2名、中国約10名、ロシア1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、来年の 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、ITER 初期 He 運転シナリオや運転シナリオにおけるタングステンと ELM 制御に関する実験とモデリング等が要請された。

ITER 運転シナリオに関する国際比較実験については、DIII-D と EAST の定常運転シナリオに関する共同実験で、 $\beta_N \geq 4$ 、 $H_{98y2} \sim 1.5$ 、 $f_{GW} \sim 1.2$ の内部輸送障壁をもつ弱磁気シアプラズマを約 4 秒間安定に維持した DIII-D の結果が報告された。この実験に対して乱流輸送モデル TGLF は実験より高い温度を予測したが、新たに帯状流効果を考慮すれば実験の温度に近くなることが示された。JET からは標準/ハイブリッド運転シナリオにおける DT 実験に向けたタングステンや ELM の制御を含めた検討状況が報告され、15 MW の核融合反応パワーがあるプラズマを 5 秒程度維持する計画であること等が示された。

He 運転シナリオについては、Alcator C-Mod の実験で重水素と同程度のペデスタル密度・温度と ELM が得られ、低密度でクリアな ELMy H モードとなるが、高密度では大

きな ELM が不規則に発生し L モードへの逆遷移が起こる結果が示された。また、輸送コード TRANSP と CORSICA によるシナリオシミュレーションの進捗状況が報告され、He プラズマにおけるペデスタル予測モデルの必要性が議論された。

プラズマ制御手法については、宮田（原子力機構）から磁気センサー信号とポロイダル磁場コイル電流からプラズマ境界の再構築が可能なコーシー条件面 (CCS) 法を ITER に適用した初期結果が報告された。ITER では中性子などに起因して磁気センサーに大きなノイズが発生することが予想されており、CCS 法を用いて ITER で想定される磁気センサーノイズ環境下でプラズマ境界を十分な精度で再構築できることを示した。

粒子輸送のモデリングに関しては、統合コード TOPICS (原子力機構) 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。一部のコードでピークした分布が得られたおり、原因を議論した結果、径方向のピンチ速度を各コードで使っている輸送方程式に合わせて定義する必要性が確認され、再度比較することになった。

この他、来年度の IAEA 核融合エネルギー会議で発表する論文内容を議論し、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た。

3. 「MHD 安定性」

第26回となる本会合には、日本1名、欧州16名、米国13名、中国4名、ロシア3名、インド2名、韓国1名、ITER 機構2名が参加した。会合では、ディスラプション (逃走電子、ハロー電流を含む)、誤差磁場、新古典テアリングモード (NTM)、抵抗性壁モードなどについて活発な議論が行われた。

ディスラプション時の放射損失の非対称性に関し、ポロイダル方向の非対称を測定した結果が DIII-D より報告され、非対称度は 1.5-2.5 であり、外部コイルによりトロイダルモード数 $n=1$ の位相を変えたときもその値は変わらないとの説明があった。また、トロイダル方向の非対称性に関し、理由はまだ明らかになっていないものの、プラズマの蓄積エネルギーとともに非対称度が減少することが AUG と JET で観測されているとの報告があった。大量不純物ガス入射 (MGI) の効果に関連して、「不健全な」プラズマ (不安定性が発生している場合など、安定なプラズマとは異なる場合を意味し、実際のディスラプションにより近い状況を想定している) としてモードロックした状態で MGI を行った報告があった。Alcator C-Mod, DIII-D, JET ではこれまでの MGI のデータと差が見られなかったが、ITER への外挿を考えると各装置ともガス入射量が多いため更なる実験が必要との説明があった。この他 AUG から、ITER での MGI に近い状況にするために MGI の量を減らした実験が行われた結果、供給粒子数が 10^{21} 以下では MGI から熱クエンチまでの時間や発生する電磁力が急激に増大するとの報告があった。

逃走電子に関して、発生した逃走電子を超音速分子ビー

ム入射 (SMBI) により抑制したとの報告が HL-2A や J-TEXT からあった。また、DIII-D から、121 視線の 2 次元硬 X 線検出装置を設置して逃走電子のエネルギースペクトルを測定する予定との説明があった。Alcator C-Mod からは、絶対較正した分光装置を用いて逃走電子発生時のシンクロトロン放射の波長スペクトルを測定した例が紹介された。

NTM に関しては、AUG, DIII-D, FTU, KSTAR, TCV などにおいて実時間 NTM 抑制システムを用いた実験が実施または予定されていることが説明された。このうち、AUG では、電子サイクロトロン波入射装置の伝送系に電子サイクロトロン放射測定装置を設置し、同じ視線のもとで磁気島構造を測定した例が報告された。

国際共同実験およびワーキンググループ活動の進展の報告を受け、既存の活動の継続/終了の議論、および新規に提案された活動の採否の議論を行った。その結果、進行中の国際共同実験10件、ワーキンググループ活動6件、理論・シミュレーション合同活動2件は継続することになった。また、新規のワーキンググループ活動として、MGI 時の逃走電子の挙動に関する研究、および「不健全な」プラズマに対するディスラプション緩和に関する研究が提案され、参加者で審議ののち承認された。

次々回以降の会合開催について議論した。前回の IAEA 核融合エネルギー会議 (2014年10月) の後の ITPA 会合では会場が分散されたために他のトピカルグループとの合同開催がほとんどできなかった。このことから、IAEA 核融合エネルギー会議 (2016年10月) の後に開催される次々回の会合ではできるだけ合同開催を開くべきとの意見があり調整することになった。

4. 「輸送と閉じ込め物理」

第15回となる本会合には49名程度 (日本7名、欧州23名、米国9名、ロシア2名、韓国3名、中国6名、ITER 機構2名、リモートも含む) が参加した。会合は分布の硬直性と閾値、L モードプラズマの shortfall 問題と準線形モデリング、自発回転、運動量/粒子ピンチの衝突に対する依存性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。

理論・シミュレーション関係では、分布の硬直性に関して、JET の L モード放電で、ICRH 加熱と NBI+ICRH 加熱を比較したとき、NBI+ICRH 加熱の場合、より小さな電子温度勾配で電子熱輸送が急速に増加することについて、局所的なジャイロ運動論コードを用いて解析した結果、電子温度勾配 (ETG) モードが不安定化する臨界電子温度勾配が電子温度/イオン温度比の変化で減少することと矛盾しないとの報告があった。また、大域的なジャイロ運動論シミュレーションで CO 方向へトロイダル方向に運動量を入射すると、生成される径電場とイオン温度勾配 (ITG) 不安定性のバルーニング角との関係から、より大きな径電場シアが生成される方向へ働き、閉じ込めが改善されるとの報告があった。L モードプラズマの shortfall 問題に関しては、flux-matching という手法を用いて DIII-D で観測されるイオン熱輸送は再現できたが、電子熱輸送は再現できない

という報告があった一方、JT-60U を対象としたシミュレーションでは電子熱輸送が再現できたが、イオン熱輸送は部分的にしか再現できないという報告があった。さらには、Alcator C-Mod を対象にした、重水素/電子の実質量比による微視的 (イオンスケール) および超微視的 (電子スケール) の両方を同時に取り扱うマルチスケールシミュレーションの結果、実験で観測される電子熱輸送を再現するにはイオンスケールのシミュレーションでは不十分で ETG モードのような電子スケールまで含めたシミュレーションが必要であるとの報告もあり、まだ解決には至っていない。

実験関係では、分布の硬直性と閾値について、DIII-D でも JET と同様にトルク入力小さい場合の方がトルク入力大きい場合よりも分布の硬直性が顕著であり、この実験結果は E×B フローシア効果と矛盾しないことが報告された。また、トルク入力小さい場合の方が、電子温度対イオン温度の比、高速イオンベータ値に対するイオン熱拡散係数の増加傾向が小さいことも報告された。自発回転の研究では、数年前より自発回転のデータベース活動が進められている。今回は、AUG, TCV, JET, KSTAR, EAST, DIII-D から関連する報告があった。また、トロイダル回転を計測する計測器の違いや自発回転の評価方法の違いがあるなかで、どのようにデータベース化していくか、どのようにデータベースを使用するかについて議論がなされた。運動量/粒子ピンチの衝突に対する依存性については、これまでの複数の装置間比較実験で得られた結果をまとめ、論文にすることを進めている。平行して、今回は運動量/粒子ピンチの DIII-D におけるプラズマ回転に対する依存性、JET における粒子ソースの再評価、MAST での運度量輸送解析方法の改善について報告があった。

5. 「ペDESTAL物理」

本会合には34名 (欧州12名、米国12名、ITER 機構2名、日本3名、中国1名、韓国4名) の参加者がおり、ITER の最重要課題である (1)RMP コイルを用いた ELM 抑制・低減化条件、(2)H モードペDESTAL 構造の理解、(3)L-H および H-L 遷移の発生条件、(4)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、今回は本年10月に ITER 科学技術諮問委員会において告された ELM 制御コイルの物理要件についての報告があった。ELM の専門家間の議論により、ELM 抑制から見た ELM 制御コイルの個数・配置・電流値は、ドーナツ状の真空容器の短周方向に3列でこれが長周方向に9セットの合計27 (= 3 × 9) 個のコイルを真空容器内に配置し、最大 90 kA ターンの電流が必要であると提言した。これにより ITER に向けた具体性のある ELM 制御コイルによる解析・モデリング研究が進むことが期待される。

DIII-D から、リチウムペレット入射による ELM 制御実験の結果が報告された。約12 Hz の自発的 ELM が発生するプラズマに対してリチウムペレットを入射することにより約 38 Hz で ELM を制御することに成功した。電子密度は

15%程度低下するが、閉じ込め性能の劣化及びMHD不安定性はほとんど観測されなかった。また、ELM周波数の増加によりダイバータ板での熱負荷が減少した。

近年、ELMが発生しないIモードプラズマの研究が進展しており、Alcator C-Mod, AUG, DIII-Dの3装置によるIモード発生条件に関する報告があった。IモードはLモードとHモードの発生領域の中間に位置しており、Hモード化しにくい高磁場領域(>2 T)で得られることが示された。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。

低Z不純物入射によるペDESTALへの影響に関する実験結果として、LH遷移パワー近傍での窒素ガス入射の報告がAlcator C-Modからあり、窒素ガス入射量を増加させていくと、放射損失パワーの増大によりLモードに逆遷移することが示された。AUGでは、不純物ガス入射により電子密度ペDESTALが内側にシフトする結果が示され、SOL領域を含めた理解が求められている。

HモードペDESTAL構造のワーキンググループから、ペDESTAL及びコアプラズマの分布をそれぞれEPED及びTGLF/NEOモデルによって自己無撞着に解く試みについ

て報告され、DIII-Dのサンプルに対し、ペDESTAL電子密度を初期条件として与えると、コア部の温度分布及び規格化ベータ値をよく再現できることが示された。浦野(原子力機構)からJETにおけるシャフラノフシフトの増加によるペDESTAL幅増大に関する報告があった。特に高ベータHモードではシャフラノフシフトの増加が大きく周辺部の局所磁気シアが普通のHモードより強められる。これによって周辺バルーニングモードが安定化され、周辺圧力勾配が増大するが、ペDESTAL幅はこのシフトの増加による安定化に常に連動して広がることを示した。

L-H遷移発生条件のワーキンググループから近年重要視されているLH遷移のX点位置に対する依存性に関する実験結果の報告があった。AUGでは、高密度側ではX点位置が低いほどLH遷移パワーが増大する。一方でAlcator C-Modでは、X点位置を下げ、外側ストライク点を通常の垂直ターゲットではなく、下側ターゲットに移動させたところ、LH遷移パワーが低下しており、X点及びストライク点の位置がLH遷移パワーに影響を及ぼすことは明らかであるが、系統的理解を得るにはさらに詳細な実験が必要とされる。