



■ITPA (国際トカマク物理活動) 会合報告(32)

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

●開催日: 2011年3月1日-4日¹, 2011年4月4日-5日², 2011年4月11日-14日³, 2011年3月30日-4月1日⁴, 2011年4月11日-13日⁵

●場所: アーメダバード(印国)¹, サンディエゴ(米国)², カラム(英国)³, ケンブリッジ(英国)⁴, フラスカティ(伊国)⁵

担当委員:

諫山明彦(原子力機構)¹, 榊原悟(核融合研)¹, 古川勝(東大)¹, 松永剛(原子力機構)¹, 山崎耕造(名大)¹, 渡邊清政(核融合研)¹, 井戸村泰宏(原子力機構)², 坂本宜照(原子力機構)², 田中謙治(核融合研)², 田村直樹(核融合研)², 矢木雅敏(九大)², 吉田麻衣子(原子力機構)², 井手俊介(原子力機構)³, 鈴木隆博(原子力機構)³, 長崎百伸(京大)³, 中村祐司(京大)³, 花田和明(九大)³, 林伸彦(原子力機構)³, 福山淳(京大)³, 相羽信行(原子力機構)⁴, 浦野創(原子力機構)⁴, 大山直幸(原子力機構)⁴, 神谷健作(原子力機構)⁴, 北島純男(東北大)⁴, 中嶋洋輔(筑波大)⁴, 森崎友宏(核融合研)⁴, 篠原孝司(原子力機構)⁵, 東井和夫(核融合研)⁵, 藤堂泰(核融合研)⁵, 長壁正樹(核融合研)⁵, 濱松清隆(原子力機構)⁵, 村上定義(京大)⁵, 山本聡(京大)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	2011年10月4日-7日	バドバ (イタリア)
輸送と閉じ込め物理	2011年10月5日-7日	カダラッシュ (フランス)
統合運転シナリオ	2011年10月18-21日	京都(日本)
ペDESTAL物理	2011年10月5日-7日	ヨーク(英国)
高エネルギー粒子物理	2011年9月12日-13日	オーステン (米国)

1. MHD 安定性

改組後第6回(通算では第17回)となる本会合は, インド・アーメダバードのプライドホテルで3月1~4日に開催された。会合では遠隔参加を含め, 米国(10名), EU(10名), インド(25名), 韓国(1名), ITER 機構(3名)の参加があり, 日本からは遠隔で2名の参加があった。始めに ITER における MHD 安定性とプラズマ制御の現状と課題が示されたのち, 各課題に関する報告, 共同実験(MDC) およびワーキンググループ(WG)に関する報告・審議がなされた。今回は遠隔参加者が多いことから, 各国

の時差を考慮した議事進行がなされた。

ディスラプションに関しては, ディスラプション時の第一壁熱負荷, 逃走電子, ハロー電流等に関する ITER での課題が示された。また, ディスラプション予測, 逃走電子実験, 垂直位置不安定性, 大量ガスパフによるディスラプション緩和などに関する報告があった。これらの発表を受け, ハロー電流のモデリングに関する WG が組織されることになった。

誤差磁場に関しては, ITER にも適用可能な計測手法として, 外部磁場に対するプラズマ応答から計測する手法が紹介された。また, 誤差磁場に関して WG-9 が組織され, ロックドモード回避に必要な誤差磁場の許容値, 誤差磁場のモデル化, 共鳴・非共鳴磁場によるブレーキング効果, ELM コイルと誤差磁場補正コイルによる補正のモデル化などに関して検討が行われることになった。

抵抗性壁モード(RWM)安定性に関しては, 運動論的效果による安定化効果と帰還制御による安定化実験について報告があった。JT-60U と DIII-D では自由境界理想 MHD 限界を超えた領域で高速イオン駆動不安定性が観測されているが, これが RWM を誘発すること, およびこの結果に関する MARS-K コード解析によるとプラズマ回転と高速イオン損失により RWM の安定性が失われることが報告された。帰還制御については, RFP 装置である RFX-mod のトカマク放電で実施した RWM 安定化実験の初期結果と 2011 年の実験計画について報告があった。RWM 帰還制御については, ITER 定常シナリオにおける RWM 帰還制御の擾乱に対する制御性の評価, ELM コイルを用いた RWM 帰還制御の評価, 既存装置における RWM 帰還制御モデルの検証を目的として, WG-7 が組織された。

鋸歯状振動制御に関しては, 鋸歯状振動崩壊を実時間で検出し, その 7ms 後に電子サイクロトロン(EC)波パワーをオフすることで鋸歯状振動周期を一定に制御した結果が TCV より報告された。また, 鋸歯状振動制御のための RF パワーに関して, 13 MW での EC 電流駆動や 10 MW 以上のイオンサイクロトロン加熱が必要との報告があった。

新古典テアリングモード(NTM)に関しては, 回転分布の NTM 発生への影響に関する理論モデルが提示され, 実験への適用例として JT-60U のデータを解析した結果が報告された。

会合の最後に次々回会合(2012年春)の開催場所が審議され, 日米 MHD ワークショップと合同で核融合研において開催される見込みとなった。

2. 輸送と閉じ込め物理

本会合(第6回)には52名(日本4名, 米国21名, 欧州14名, 韓国8名, 中国3名, ITER 機構2名)が出席した。

本会合のセッションは, ITER 予測に向けた装置間比較

実験, ステラレータとトカマクの比較, Hモードワークショップに向けたグループ論文, EASTとKSTARでのHモード実験の結果, 電流ランプアップ時のモデリングの構築, コアと周辺の境界領域での輸送特性の研究で構成され, それぞれの報告および議論が成された. 装置間比較実験では, 主に閉じ込めのベータ値依存性, 運動量輸送や残留応力(自発回転の駆動源)のスケーリングの構築, Iモード特性, 粒子輸送特性に関して, 研究の進展と結果が報告された.

オープニングセッションでは, 議長による本会合の主旨説明があった後, EASTでの初のHモード実験の結果に関する報告があった. LHCDとICRFを用いて定常ELMy Hモードが得られ, またGAM振動が消失するとの報告があった. その後KSTARから初期的なHモード実験の結果と今後の予定について報告がなされた.

ステラレータとトカマクの比較は, 前回の会合から活動が開始されている. 今回のセッションでは, まずステラレータとトカマクで異なる現象として, 分布の硬直性と同位体効果があり, それらへの帯状流の影響について報告があった. その後, 田中(核融合研)が, LHDで観測されたELMからELM free H modeへの遷移現象を, DIII-DのRMP実験と比較して報告した. DIII-DではRMP印加後, ELMが抑制される. それと同時に密度の減少と密度揺動の増加が観測されているが, LHDではELM free状態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報告された. また, 両装置において現象が大きく異なることが指摘された.

Hモードワークショップのグループ論文に向けた議論では, 2009年より持続的に進めている運動量輸送に関する国際データベースの構築と, これを用いた解析結果のまとめ, 更に論文のシナリオについて, 吉田(原子力機構)がTV会議で報告した. また, 閉じ込め改善度 $H_H \sim 1$, 且つLH遷移パワーに近い運転領域での閉じ込め特性に関する論文についても議論がなされた.

装置間比較実験のセッションでは, 全部で9件の報告があった. 閉じ込めのベータ値依存性に関して, プラズマ全体の蓄積エネルギーで規格化されたベダスタル部の蓄積エネルギー(W_{ped}/W_{th})が, DIII-DとASDEX Upgradeではベータ値と伴に減少するが, NSTXでは変化しないことが示された. また揺動スペクトルとベータ値の関係は顕著でなかったことが報告された. 運動量輸送と粒子輸送のパラメータ依存性に関しては, 運動量の拡散項と非拡散を切り分けるために, NBIの変調入射を用いた運動量の摂動輸送解析が, 新たにASDEX UpgradeとAlcator C-Modにおいて行われたことが報告された. ヘリウム輸送の研究では, 新古典理論とジャイロ運動論を用いたモデルと実験との比較がなされ, $r/a \sim 0.3$ では新古典輸送が無視できず, $r/a \sim 0.5$ や 0.7 では乱流輸送が支配的であることが示された. Iモード特性に関しては, ASDEX Upgradeでは低磁場の条件でIモードが得られたこと, またAlcator C-ModではEDA Hモードに比べるとIモードの温度ベダスタルは高いが, 密度ベダスタルは低いため圧力としては半分程度であ

ることが示された. 装置間比較実験に関する全体討論では, 粒子輸送ワーキンググループに関してITER機構から報告があり, 輸送と閉じ込めトピカルグループにおいて, 実験やモデリング等の1~1.5年の活動が同意されていること, トピックとしては, 周辺部の輸送, ELM緩和, コア部と周辺部の密度の相関, バルクと不純物イオンの密度コントロール, ヘリウムHモード特性が上がっているとの説明があった.

今回, コア部と周辺部の境界領域($r/a \sim 0.6-0.9$)での輸送特性の理解に向けた議論が成された. この領域は, コア部と周辺部の間に位置し, 理論的な予測が難しく, "No Man's Land"と呼称される領域である. 理論的には, 境界領域では, 雪崩現象や熱輸送に特徴とされる非局所的な効果によりコア部から影響を受けることや, 乱流の内向きの伝搬により周辺部から影響を受けることが考えられると示され, 実験や更なるモデルの策定が必要であると議論があった.

3. 統合運転シナリオ

第6回会合が英国カラム核融合エネルギーセンターで開催された. 今回の会合には, 日本(1人), 欧州(17人), 米国(9人), ロシア(1人), 韓国(1人), ITER機構(4人)が参加した(テレビ会議参加も含む).

統合運転シナリオ・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. そのために国際装置間比較実験とモデリング活動を両輪として進めている. 今回も, 国際装置間比較実験の進展報告と今後の計画の策定, ITERの運転シナリオや加熱・電流駆動に関するモデリング活動の現状報告と今後の構成に関する議論を行った. モデリング活動の組織化についても国際装置間比較実験同様のサブグループ化を行うことにより進めていく体制が整えられた.

議長から, 昨年末行われた調整委員会と国際共同比較実験の計画会合について報告が行われた. ITER機構からは, ITER計画の進展の現状と物理課題検討の現状およびITERにおける制御に関して報告があった. プラズマ制御システムについては, 2012年の6月までに概念設計を取りまとめる予定となっている. ITER機構からは, 電子サイクロトロン波(ECRF)加熱ランチャーの設計についても提案があった. 水平ランチャーの現状のトロイダル方向調整機能に対してポロイダル方向の調整の可能性をITER機構が中心となって検討することとなった.

各装置から現状と今後の実験予定に関して報告があった. JETから統合運転シナリオ関連の実験予定とともに, 主なプラズマ対向壁をタングステンにするILW(ITER Like Wall)の現状について報告があった. 8月からILWでの実験が始まる予定である. JT-60Uからは, 先進誘導運転に関連して, JT-60Uの長時間放電における電流分布のしみ込みについて井手が報告を行った.

国際装置間比較実験に関しては, 12件の実験提案について, その現状と今後の予定について報告があった. ITER

標準運転シナリオのデモンストレーション実験 (IOS-1.1) では、JETやDIII-Dに加え、Alcator C-ModやASDEX Upgradeで放電の最適化や放電時間の伸長が進んでいるとの報告があった。ITER 標準運転プラズマへの不純物注入の影響を調べる実験 (IOS-1.2) に関する現状報告と、それに関連してJETでの不純物入射によるダイバータ熱負荷低減と閉じ込めへの影響についてネオンや窒素を入射した時の振る舞いの違いについて報告があった。イオンサイクロトロン波帯波 (ICRF) のカップリングに関する実験 (IOS-5.2) では、ICRF 入射時の SOL プラズマ分布計測が各装置で準備されているとの報告があった。

運転シナリオや加熱／電流駆動に関するモデリング活動に関しては、既存装置における ITER 模擬実験結果のモデリング／ITER における典型放電 (標準運転、ハイブリッド運転、定常運転) のモデリング／加熱装置のコード間のベンチマーク等を進めている。前回の会議でこれらを8件の共同モデリング活動に振り分け今後の進め方を議論することとした。これを受け前回に決めた担当者の提案と計画を基に議論を行った。さらに ITER の非放射化フェーズの運転シナリオのモデリングについても共同で活動を行うことが提案された。非放射化フェーズでのシナリオ開発にはこのフェーズでの ICRF 加熱のモデリングが重要である。すでに提案にある ICRF 加熱のモデリングと連携して進めていく。プラズマ電流立ち上げのモデリングに関しては、ITER 模擬放電のモデリングが進行している。また、電流立ち下げ時のモデリングについても電流立ち下げに関する国際装置間比較実験 (IOS-2.2) を踏まえ進んでいる。鍵となる立ち下げ時の密度の振る舞い等を含めモデリングを行っていく。その他、米国から SWIM (Simulation of wave Interactions with MHD) プロジェクトによる ITER モデリングに関して、欧州から、EFDA の下で行われている ISM (ITER SCENARIO MODELLING) 活動と F4E (FUSION for ENERGY) の下で行われているモデリング活動の現状について報告があった。

最後に、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を取り決め、会議を終了した。

今回は京都大学で今年10月に開催予定である。

4. ペDESTAL物理

本会合 (第20回) には30名 (米国16名、欧州5名、ITER 機構4名、中国3名、韓国2名) が参加した。東日本大震災の影響により、残念ながら日本からは TV 会議での参加のみとなった。中国と韓国のトカマク装置で H モードが相次いで得られたことから、今回の会合では EAST, HL-2 A, KSTAR における H モード実験のレビューセッションを設けた。また、ペDESTAL 構造、粒子輸送、ELM のモデリングと制御、LH 遷移物理、国際装置間比較実験の現状報告等の重要議題に関する討議を行った。

ペDESTAL 構造に関するセッションでは、ELM 間のペDESTAL の回復過程と EPED モデルとの比較、温度分布にのみ輸送障壁が形成される I-mode, ELM 後にペDESTAL が急成長する Enhanced Pedestal H-mode 等に関する最近

の研究結果が報告された。EPED モデル拡張の現状についての報告では、JET で得られた137点のペDESTAL データとモデルを詳細に比較し、実験値／予測値は 0.97 ± 0.21 であることが示された。

アジアの超伝導トカマク装置における H モード研究に関するセッションでは、H モード遷移閾値パワーや閉じ込め時間のスケールリングとの比較といったグローバルパラメータの比較だけでなく、ペDESTAL 分布や ELM の計測結果についても報告があり、装置間比較実験への今後の貢献が期待されている。

RMP による ELM 制御に関しては、ASDEX Upgrade 装置における初期実験結果の報告があった。 $n=2$ の摂動磁場によって ELM の安定化が可能であること、共鳴・非共鳴どちらでも ELM は安定化できたことが示された。ただし、規格化衝突度は 1.5-3 の領域であり、低規格化衝突度における実験が期待されている。また、コイルを増設した MAST の実験計画、NSTX における摂動磁場印加時のダイバータプラズマの振る舞い、M3D-C1 コードによる摂動磁場の回転によるスクリーニングの評価等も示された。ペレット入射による ELM 制御に関しては、ELM 周波数を5倍 (熱負荷は 1/4) にできた DIII-D の結果と JET 装置における今年度の研究計画が示された。

ELM のモデリングに関しては、M3D, JOREK, NIMROD, BOUT++ といった非線形 MHD コードによって、線形 MHD コードとの違い、フィラメント構造の形成、ペレット入射による ELM 発生等に関する計算結果が示された。

装置間比較実験に関するセッションでは、ペDESTAL 物理トピカルグループからの提案はすべて承認されたことが議長から説明されるとともに、各実験提案の現状と計画が説明された。周辺ストキャスティック層における輸送特性に関する比較実験 (PEP-19) では、LHD と DIII-D における比較実験が計画されていることが報告され、ヘリカル装置との比較実験の事例として注目が集まった。

5. 高エネルギー粒子物理

本会合 (第6回) の参加者は28名 (内日本より3名) であった。25件の発表があった。

はじめに、Putvinski より、ITER の進捗状況と現在の課題が示された。特にディスラプション緩和システムの構築と ELM 緩和法確立が急がれる旨の発表がなされた。前者については、大きな磁場擾乱を用いた手法が候補となり ASDEX Upgrade, Tore Supra, T-10 でのテストに期待をよせているとのことであった。高エネルギー粒子物理については、逃走電子の振る舞いのモデリングや ELM コイルが作る磁場中でのアルファ粒子や NB イオン閉じ込めのさらなる評価が求められた。

非線形コードでは、アスペクト比10の円形トカマクにて $n=6$ の TAE モードで線形成長率やモード固有周波数 (実周波数) など線形解析に関するベンチマーク結果が議論された。MEGA (核融合研), HMGC, CKA-EUTERPE, TAEFL, AE3D-K, GYGLES コードの最近の進展が発表さ

れた。線形部分のベンチマークのため、LIGKA も比較に参加した。TAE モードの成長率について MHD モデルに基づく MEGA と CKA-EUTERPE は非常によい一致を示し、HMGC も両コードに近い結果を与えた。細部まで同一の設定条件を用いることによりさらに良好な一致が期待できるので、設定条件の留意点を確認し次回まで本ベンチマークを継続することとした。

線形コードのベンチマーク活動については、JET の DT 実験でのアルファ粒子起因 AE の安定性評価と ITER の安定性評価を通して進めていくこととなった。前者については、複数の AE の可能性があることや複数の高速イオン種を取り扱うなどの難しさが指摘された。ITER の安定性評価については最新の運転シナリオ 2 から始めることとし、その後、パラメータ依存性の調査や運転シナリオ 4 の調査を行うこととなった。

実験の発表については、TFTR からは高ベータプラズマでの高速イオンの閉じ込め劣化について報告があり、この閉じ込め劣化はこのとき観測された MHD や AE では説明できず、また E_{beam}/T_i に対する依存性から静電的微視的乱流の影響も除外でき他の電磁場揺動によるものであろうと報告された。DIII-D と LHD から EGAM に関する発表があった。DIII-D ではモデリングが進展し、より良く実験を再現できるようになった。NSTX は新たに 16 ch の反射計、高速サンプリングの BES、接線 FIDA、計測ビームとレーザー励起を用いた MSE の整備とコードの整備が進んでいる旨が報告された。

共同実験はそれぞれ順調に進んでいる。EP2 は NSTX, JET, DIII-D, ASDEX Upgrade, MAST での近況が報告された。DIII-D と ASDEX Upgrade については RSAE によるコヒーレントな高速イオン損失が詳細に報告された。EP3 については DIII-D の成果とモデリングの進展

に加え、基礎プラズマ装置による基礎研究の状況も報告された。EP4 では LHD で観測された様々な非線形現象とパラメータ領域が報告された。また、Berk-Breizman モデルの応用として磁場揺動の時間発展のみからモードの成長率、減衰率やプラズマの衝突周波数を求める手法が紹介された。EP5 については、9 月に予定されている TBM モックアップ実験で取り組むべき課題が議論された。EP6 については ASDEX Upgrade と LHD から ELM と高速イオンの輸送の強い相関を示唆するデータが報告された。

ITER の高速イオン計測器については、協同トムソン計測と損失イオン計測について報告があり、高エネルギー粒子物理トピカルグループとしての意見が求められた。共同トムソンは磁力線に平行方向の計測に適切な高磁場側に提案していたシステムが予算的に認められていないとのことであった。損失イオン計測はプローブヘッドが最大 20 MW/m² の熱負荷を受けるため、可動方式にする予定である旨が発表された。

テスト粒子を用いた高速イオン閉じ込め評価については、DIII-D で実施されたテストブランケットモジュール (TBM) モックアップコイル実験のトリトン閉じ込め評価が OFMC (原子力機構)、ASCOT により実施され、それぞれ報告された。結果、トリトンのラーマ半径が大きいため案内中心が適用できず、案内中心コードでは実験を再現できないことがわかった。一方、粒子軌道を追跡する場合は誤差を考慮して説明できた。加えて、ASDEX Upgrade の RMP コイルが中性粒子ビーム起因の高速イオンに与える影響の評価が発表された。両コードともダイバータ部の熱負荷の上昇を示した。

今回は、米国オースチンにて「第12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」の直後の 9 月 12, 13 日に開催することとなった。