

■ ITPA(国際トカマク物理活動)会合報告(60)

分野: 「MHD安定性」¹, 「統合運転シナリオ」², 「ペデスタル物理」³, 「高エネルギー粒子物理」⁴

開催日: 2017年3月22日-24日¹, 2017年4月3日-6日², 2017年4月18日-20日³, 2017年4月26日-4月28日⁴

場所: 成都(中国)¹, サン・ポール・レ・デュランス(フランス)², ヨーク(英国)³, セビリア(スペイン)⁴

担当委員:

諫山明彦(量研機構)¹, 榊原悟(核融合研)¹, 白石淳也(量研機構)¹, 古川勝(鳥取大)¹, 政宗貞男(京都工繊大)¹, 松永剛(量研機構)¹, 渡邊清政(核融合研)¹, 井手俊介(量研機構)², 林伸彦(量研機構)², 福山淳(京大)², 鈴木隆博(量研機構)², 長崎百伸(京大)², 花田和明(九大)², 藤田隆明(名大)², 相羽信行(量研機構)³, 浦野創(量研機構)³, 神谷健作(量研機構)³, 大山直幸(量研機構)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, 藤堂泰(核融合研)⁴, 長壁正樹(核融合研)⁴, 永岡賢一(核融合研)⁴, 篠原孝司(量研機構)⁴, Andreas Bierwage(量研機構)⁴, 村上定義(京大)⁴, 山本聡(京大)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	日程未定	場所未定
統合運転シナリオ	2017年10月9日-12日	リスボン (ポルトガル)
ペデスタル物理	2017年9月18日-20日	ヘルシンキ (フィンランド)
高エネルギー粒子物理	2017年9月11日-13日	プリンストン (米国)

1. 「MHD安定性」

第29回となる本会合には, 日本3名, 米国6名, 欧州8名, 中国26名, ロシア1名, インド1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(逃走電子も含む), 誤差磁場・3次元磁場効果, 及び新古典テアリングモード(NTM)などについて活発な議論が行われた。

逃走電子に関し, J-TEXTから, 大量ガス入射(MGI)による逃走電子電流の散逸実験において, 入射量に対し逃走電子電流の減衰率が飽和することが報告された。また, MHD揺動が観測された場合は逃走電子電流の減衰率が小さい傾向があり, MHD揺動が逃走電子の散逸を妨げる可能性があることが報告された。HL-2Aから, MGIでは高Zガスのみが逃走電子緩和に効果的である一方, 超音速分子ビーム入射(SMBI)では低Z(He)分子でも有効であることが報告された。また, SMBI逃走電子緩和フェーズにおいて, 逃走電子のエネルギー分布が変化することが報告された。

ディスラプション予測に関し, ASDEX-U(AUG), COMPASS, JETのデータベースを用い, ロックモードの振幅と, ディスラプション緩和システム(DMS)の警告時間との相関についての研究が報告された。また, DIII-Dのデータベースに対し, 教師あり機械学習を適用してディスラプションを判定するアプローチについて報告があった。

ディスラプション時のポロイダル電流に伴い真空容器にはたらく電磁力がITERで巨大となりうること(〜数十MN)を示す理論的考察が報告された。加えて, その理論モデルに基づいてITERの真空容器における電磁力を計算した数値解析(CarMAONL)も報告された。この課題は, 真空容器にはたらく電磁力がITERで問題となりうることを指摘しているため, 次回の会合において, 専門家を招聘し, 議論することが提案され, 承認された。

NTMに関し, 非線形相互作用する2ヘリシティ($m/n = 2/1, 3/2$, ここで m はポロイダルモード数, n はトロイダルモード数)シミュレーションのベンチマークが完了し, シア流がある場合のベンチマーク及び実験との比較検証が開始されたことが報告された。HL-2Aから, 低密度・低回転プラズマにおいて, 誤差磁場により, $2/1$ 及び $3/2$ のNTMsが低ベータ領域において駆動されたことが報告された。また, co方向入射中性粒子ビーム(NB)によるシア流により $2/1$ モードが安定化されることが報告された。DIII-Dから, 低トルクのITERベースラインシナリオでの, 電子サイクロトロン(EC)波によるNTM安定化実験が開始されたことが報告された。

ITERにおける $n=1$ 誤差磁場の閾値評価における3モードモデルとオーバーラップモデルの詳細な比較が報告され, オーバーラップモデルを採用すべきであることが報告された。ただし, オーバーラップが小さい高磁場側における検証等が必要であるとのコメントがあった。COMPASSから, オーバーラップモデルの高磁場側での検証が始まり, Lモードプラズマでは定性的に実験と一致することが報告された。今後は, Hモードプラズマや高パワーのNB入射のもとでの検証を行う予定であることが報告された。

2. 「統合運転シナリオ」

今回は当グループの第18回目の会合で, ITER機構で開催された。日本1名, 欧州16名, 米国6名, 韓国1名, ITER機構4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の進捗の報告と議論, 軽水素やヘリウムを用いた非放射化フェーズ運転, プラズマ制御手法, 運転シナリオのモデリングに重点が置かれた。また昨年開催されたIAEA会議で発表されたグループ共同論文のフォローアップのための議論があった。

ITER機構からは, ITERのファーストプラズマからDT運転に至るまでの段階的取り組み計画と各段階の目的, 加

熱装置を中心とした設備整備の予定、物理課題についての報告があった。放電シナリオ開発は当グループの主な役割の一つであり、加熱手法を中心に特に非放射化フェーズでの放電シナリオの議論を行った。非放射化フェーズでは定格の半分のプラズマ電流／トロイダル磁場 (7.5 MA／2.65 T) で主にヘリウムのHモードプラズマを得てELM制御やディスラプション低減の試験を行い、合わせて制御や加熱装置等の調整を行う。また、Lモードで短パルスの定格 (15 MA／5.3 T) 運転を目指す。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) の開発状況の報告も行われた。欧州を中心に加熱・電流駆動コードの IMAS への導入が進んでいる。ちなみに、本グループで各装置から提供されるデータはできるだけIMASに準拠することが推奨されている。

国際比較実験に関連してDIII-D, KSTAR, Alcator C-Mod, AUG, EAST, JET等各国の装置の現状や運転計画の報告が行われた。DIII-DではITER標準運転模擬放電でのプラズマ安定性が安全係数 $q=2$ 面での電流分布の勾配に関連するとの報告があった。JETでは、DTでのITER標準運転模擬放電に向けた検討等について報告が行われた。

プラズマ制御手法に関しては、プラズマ応答にシミュレーションやモデルを用い、複数のパラメータを同時制御する手法について報告があった。DIII-Dの回転や蓄積エネルギーの同時制御の検討の報告もあり、実際の実験への適用が期待される。今後はこのような先進的な複合制御が、ある一つのアクチュエータ、例えばECRF、を異なる複数の制御に使い分けるactuator sharingも含め、ますます重要性を増していくだろう。

運転シナリオモデリングにおいても、非放射化フェーズの放電シナリオのモデリングがいくつか報告された。非放射化フェーズでは主に2.65 Tで運転するため、ICRFを用いた加熱シナリオはどの加熱スキームを用いるかが課題となる。ペデスタルのモデリングについては、EPED1に基づき作成された look up tableを用いた時間発展シミュレーションについて報告があった。これまで ITER 標準運転については 15000 点を含むテーブルが作成され、これによりプラズマパラメータの時間変化に対応したペデスタルの評価が可能となった。

次回会合では、ITER標準運転シナリオのモデリング、加熱・電流駆動のモデリング、先進運転シナリオのモデリング、プラズマ制御手法にフォーカスして議論を行うとともに、年末のITPA調整会議で報告・提案する国際比較実験について重点的に議論を行うこととなった。

3. 「ペデスタル物理」

本会合には 28 名 (欧州 16 名, 米国 7 名, ITER 機構 1 名, 日本 1 名, 中国 3 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) ペレット入射によるELM制御条件, (3) Hモードペデスタル構造の理解, (4) LH遷移の発生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。会議の冒頭で ITER の初期運転フェーズで導入が検討されている4段階のアプローチにおける研究計画についての説明があった。非放射化フェーズ 1 (PFPO1) のHe運転時のHモード実験の可能性を広げるために、従来の 20 MW の ECRFに加え、10 MW の ICRFが導入される計画の改定が報告された。但し、1.8 T運転ではフェライト鋼のオーバーキャンセルによってリップルが 1%を超えるため、閉じ込め性能の劣化が懸念される。非放射化フェーズ 2 (PFPO2) からRMPコイルが本格的に運用され、ELM熱負荷低減の最適化を行う計画であるとの報告があった。

DIII-Dでは、 $\beta_N \sim 1.7$ のITER標準運転シナリオを想定した放電での重水素ペレット入射でダイバート板でのELM熱負荷の低減に成功したという報告があった。10 HzのELM周波数で 350 W/cm²程度のピーク熱負荷を 90 Hzの周波数で 30 W/cm²以下に低減した。一方でペレット周波数を上げると周辺電子密度が増加し、周辺電子温度が大きく低下し、ペデスタル圧力としては 20 - 30%程度低下した。また、DIII-Dからリチウムペレット入射によるELM制御実験の結果も報告された。12 Hzの ELM周波数を持つ参照放電に対して、38 Hzで ELMを制御すると、リチウムペレットにより強い密度排気が現れ、ペデスタル電子密度が低下し、エネルギー閉じ込め時間が 10%低下した。

RMPコイルによるELM制御に関して、AUGとDIII-Dの国際装置間比較実験において、高三角度化によってH98 = 0.95, $\beta_N \sim 1.8$ で約 50 τ_E 間 ELMの抑制に成功したという報告があり、ELM緩和 (mitigation) の条件としてペデスタル部の規格化衝突周波数が 0.3 以下でプラズマ周辺部がキンクモードによる揺動を伴う必要があり、ELM消失 (suppression) には、プラズマ形状、回転 (シールド効果を防げる)、 q_{95} 運転領域の各パラメータの最適化が要求されるという報告があった。また、DIII-DからはRMPを印加するとエネルギー閉じ込め時間と同程度のタイムスケールで密度排気を伴う閉じ込め劣化が起きた後に、蓄積エネルギーが回復するフェーズが出現するが、これは周辺トロイダル回転のスピンアップによるE×Bシア率の増加で周辺イオン温度が増加することが原因であるという報告があった。

ペデスタル構造のワーキンググループでは、EPEDモデルではペデスタル電子密度分布を入力値として与えなければならないが、そもそもペデスタル電子密度分布がどのように決まるのかという問いに答えなければならないという議論があった。JETからはペデスタル予測のために、ペデスタル電子密度の比例則と中性粒子透過モデルを導入するという試みを行ったという報告があった。比例則を用いる方法は実験データをよく再現したが、他装置への外挿性が低い。一方で中性粒子透過モデルを用いた方法は再現性が低く、モデルの拡張する必要があるなどの議論があった。

LH遷移のワーキンググループでは、ITER Research Planの改訂に伴って、特にPFPOフェーズでのLH遷移について検討を進めていくという報告があった。金属壁、低ト

ロイダル回転／トルク、ダイバータ配位、リップル等の条件でLH遷移パワーがどのように影響されるかを十分に検討していく必要がある。また、EASTでIモードを発生させることに成功したという報告があった。性質は従来のIモードと同じだが、コア部の電子温度の改善が支配的であり、この点が異なる。今後、国際データベースの構築と並行して、EAST、KSTAR、TCV等でも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。

4. 「高エネルギー粒子物理」

第18回となる本会合は、スペインのセビリア大学にて開催された。参加者はリモート参加も含め約50名、40件の発表があった。主催者であるM. Garcia-MunozがITERの損失高速イオン計測の取りまとめとして活動していることもあり、今回特に損失高速イオン計測に関する報告が多かった。

はじめに、ITERの進捗状況の説明として、建設の現状とともにITERリサーチプラン改訂活動の現状が報告され、現在のスケジュールでは、NBの入射が2032年頃、重水素運転が2036年頃であることが示された。NBの入射までは高速イオン源はICRFが生み出す高速イオンということになる。また、ITERにおける高エネルギー粒子物理に関わる課題の確認が行われた。

共同実験では、ELMとRMPなどの周辺磁場摂動に起因する高速イオン損失を扱うEP6では、AUG、DIII-Dにおける数値計算の最新の進展が報告された。KSTARからはRMPのコイル位相をわざとずらしたELM制御の実験で得られた損失高速イオン計測の報告があった。また、理論モデルを用いたITERでのRMPの影響に関する報告もあった。不安定性も考慮したNB電流駆動の検証を扱うEP8では、NSTX、NSTX-U、DIII-D、AUG、TCVの解析の報告があり、理論とよくあっている旨報告された。ただし、今回AUG、TCVのケースは不安定性がない場合である。イオンサイクロトロン放射(ICE)の損失高速イオン診断への利用を評価するEP9については、新規の実験からの貢献と理論検討の最新の情報が報告された。実験による貢献ではLHDからELMバーストに同期したICE周波数帯の信号検出の報告があった旨紹介された。高 q の定常運転シナリオにおける高速イオンおよび熱イオンの

輸送を扱うEP10では、DIII-D、JET、EASTよりデータ提供があった旨報告があった。計測による高速イオンの速度空間分布再構築を議論するEP11では、JETとAUGよりICRF加熱時の速度分布の再構築に関する報告があった。アルヴェン固有モード(AE)制御のアクチュエータ検討に関する共同実験EP12については、これまでのEC、ICRF、NBによるAEへの影響報告のレビューとAUG、DIII-D、LHD、Heliotron-J、TJ-IIの最近の実験結果の報告があった。

高速イオン計測に関する報告としては、上記のように損失高速イオン計測の報告が多数あった。そのうちシンチレータスクリーンを用いる損失高速イオン検出器(FILD)については、ITERのFILDの設置方法として前回は全機器を真空容器内に設置する磁気駆動方式のみが示されたが、中性子による核発熱を考えるとよりプラズマから離して格納できるニューマチック駆動の直線型方式の方がよいのではないかという案が示された。また、FILDの絶対量測定のための解析手法に関する報告もあった。FILD以外の損失高速イオン計測として、ダイバータドーム下に設置するシステムの概念設計も示された。実現には高い放射熱への対処など技術的課題を克服する必要がある旨報告された。 γ 線計測は視線が中心付近に限られているが十分な信号が確保できる旨示された。ITERの高速イオンDalpha計測(FIDA)は加熱NB(HNB)と計測NB(DNB)のいずれへも対応しており、SOLの損失イオン計測について幾つかのアプローチがあることが示された。そのうち2つはHNBでも対応できる。DNBは、稼働サイクルが短いことが懸念されており、HNBで対応できるオプションがあることは重要である。

シミュレーション・モデリングの分野では、新たなベンチマーク活動としてベータ駆動AE(BAE)とベータ駆動アルヴェン音響波固有モード(BAAE)を対象として実施することとし、多数のレビュー報告と進め方が議論された。また、MEGAコードを用いたLHDのバースト不安定性の解析結果が紹介された。

今回は、PPPLにて9月5-8日に開催される「第15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」の直後に行うこととなった。

(原稿受付日：2017年5月18日)