

■ ITPA(国際トカマク物理活動)会合報告(72)

分野: 「高エネルギー粒子物理」¹, 「周辺ペダスタル物理」², 「輸送と閉じ込め」³, 「統合運転シナリオ」⁴, 「MHD安定性」⁵

開催日: 2019年9月9日~11日¹, 2019年10月14日~16日², 2019年10月14日~17日³⁻⁵

場所: 那珂(日本)¹, 合肥(中国)²⁻³, ガルヒン(ドイツ)⁴⁻⁵

担当委員:

藤堂泰(核融合研)¹, 長壁正樹(核融合研)¹, 永岡賢一(核融合研)¹, 篠原孝司(量研)¹, Andreas Bierwage(量研)¹, 村上定義(京大)¹, 山本聡(量研)¹, 相羽信行(量研)², 浦野創(量研)², 神谷健作(量研)², 大山直幸(量研)², 鈴木康浩(核融合研)², 森崎友宏(核融合研)², 井戸毅(核融合研)³, 田中謙治(核融合研)³, 田村直樹(核融合研)³, 本多充(量研)³, 宮戸直亮(量研)³, 吉田麻衣子(量研)³, 今寺賢志(京大)³, 林伸彦(量研)⁴, 鈴木隆博(量研)⁴, 坂本宜照(量研)⁴, 長崎百伸(京大)⁴, 花田和明(九大)⁴, 藤田隆明(名大)⁴, 横山雅之(核融合研)⁴, 諫山明彦(量研)⁵, 榊原悟(核融合研)⁵, 白石淳也(量研)⁵, 古川勝(鳥取大)⁵, 政宗貞男(中部大)⁵, 松永剛(量研)⁵, 渡邊清政(核融合研)⁵
(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	2020年3月9日-13日	土岐(日本)
輸送と閉じ込め	2020年3月23日-26日	ガルヒン(ドイツ)
統合運転シナリオ	2020年3月30日-4月2日	プリンストン(米国)
高エネルギー粒子物理	2020年3月31日-4月2日	オークリッジ(米国)
周辺ペダスタル物理	2020年4月28日-30日	サンディエゴ(米国)

1. 「高エネルギー粒子物理」

第23回となる本会合は, QST 那珂核融合研究所にて開催された。参加者はリモート参加も含め45名で, 22件の発表があった。

はじめに, ITERの進捗状況がITER機構のS. Pinches氏から報告された。次にITER機構の人事の話があった。機構長のB. Bigot氏が次期5年の延長となり, S. Pinches氏はPlasma Modelling & AnalysisのSection Leaderとなった。また, 2020年以降建設重視の体制となるようにITER理事会に要求されている旨説明があった。加えてITERリサーチプランにおける優先R&D課題のうち高エネルギー粒子物理に関わる課題が示され, 対応を議論した。

共同実験の報告は次のとおりである。ELM(周辺部に局在した不安定性)と共鳴磁場摂動(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共同実験EP6からは, ASDEX Upgrade (AUG)の条件におけるELM相当の不安定性の励起と, これによる高速イオンへの影響に関するMEGAコードの結果が報告された。また, MARS-FとASCOTコードを用いて行われたITERの様々なRMP条件下での高速イオン損失に関する報告もあった。不安定性を考慮した中性粒子ビーム(NB)電流駆動の検証を扱うEP8からは, KSTARの新古典テアリングモード(NTM), MAST-UのFishbone, NSTX-Uのアルヴェン固有モード(AE)とFishbone/Kinkモードの混在下でのNB電流駆動(NBCD)について, kickモデルによる解析結果が示された。KSTAR, MAST-Uのケースでは不安定性を考慮しないと誘導電流寄与分が不適切な値になるが不安定性を考慮することで改善されたと報告された。イオンサイクロトロン放射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, EPOCコードによるLHDの実験データ解析の報告, DIII-Dにおける反射計による観測結果の報告があった。IAEA技術会合でのJT-60Uの発表も引用された。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からは, AUGでの鋸歯状振動の高速イオンへの影響を特定の空間領域の速度分布関数ではなく, エネルギー・軌道の最大主半径(正準トロイダル角運動量に相当)・最大主半径位置でのピッチの3変数(“軌道座標系”と呼んでいた)で表現した報告があった。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, DIII-D, AUG, KSTARから最新の実験の報告があった。DIII-Dではoff-axis NBCDと電子サイクロトロン電流駆動(ECCD)により高速イオン分布と安全係数分布を変化させて負磁気シアAEを抑制し, AUGではECCDで磁気シアを変えることでAEを抑制していた。

数値計算のベンチマーク活動については, ベータ誘起AE(BAE)とベータ誘起アルヴェン音響波固有モード(BAAE)を対象としたベンチマーク活動について報告があった。DIII-Dの実験結果を対象としたベンチマークケースについて, LIGKA, GTC, FAR3Dコードを用いた報告があった。前回に引き続きLIGKAのみが実験と同じトロイダルモード数 $n=6$ を最不安定モードとしている。共鳴粒子が10-30 keVの捕捉粒子であるという結果を得, 実験でビームを切ってもしばらく不安定性が出ていることと対応すると報告された。

その他, 個別の発表として, 3種イオンのイオンサイクロトロン加熱の実験(AUG, JET), AEの実験(EAST, TJ-II), 高速イオン輸送の簡約モデルのResonance Broadened Quasi-linearモデルの進展, 高速イオン不安定性関連コード(今回はORB5, XTOR-K, NIMROD)の最新の解析, 軌道追跡モンテカルロコード(今回はASCOT, LOCUST-GPU)の機能向上の報告があった。また, Spong氏より, 波と高速イオンの相互作用についてソースとシンクも考慮した長時間に渡る数値計算の重要性とTAEFLジャイロ流体コードによる取り組みの報告があった。

加えて, 若手のためにITER Physics Basis 2007(Nuclear Fusion誌)後の高エネルギー粒子物理の進展をまとめた

共同論文を執筆することを確認した。次回は具体的な内容を議論することとした。

2. 「周辺ペDESTAL物理」

第36回となる本会合には23名(欧州5名, 米国8名, ITER機構2名, 日本1名, 中国7名)の参加者があり, ITERの最重要課題であるELMの物理と制御, HモードペDESTAL構造の理解, 国際装置間比較実験等の現状報告に関して討議が行われた。

RMPによるELM抑制領域へのアクセス条件に関する議論が行われた。DIII-Dでは, ペDESTALトップ位置でのE×B速度がゼロ値となることがELM抑制の鍵であることを示唆する実験結果が示された。また, これに伴ってペDESTAL部でのトロイダル回転速度にもELM抑制領域への遷移が起こる閾値が存在する。KSTARではペDESTAL部のトロイダル回転速度の閾値はRMPコイル電流値の増加とともに減少する結果が示された。一方で, AUGではペDESTAL部でのトロイダル回転速度には明確な遷移の閾値が現れないという結果が示された。実効電荷数 Z_{eff} がRMPを抑制するE×B速度に影響する理論モデルが提唱され, AUGとDIII-Dの相違を説明できるかどうか検討が進められている。

ペDESTAL構造に関するセッションでは, 近年注目を集めている電子密度分布のペDESTAL構造に関する報告があった。JETでは, 外側ストライク点位置や第一壁材(炭素, ITER類似壁)の相違によらず, ペDESTAL部の圧力はセパトリクス位置での電子密度の増加とともに減少する結果が示され, この結果はAUGの結果と一致する。また, セパトリクス位置での電子密度は, 中性粒子圧力とともに単調に増加しており, ペDESTAL部の構造パラメータはセパトリクス位置での電子密度に強く関連しており, 独立にコントロールすることが困難であるという結果が示された。一方でITERでは, ダイバータ板での熱負荷低減のためにセパトリクス位置での電子密度は高く, さらにペDESTAL部での中性粒子のイオン化は少ないことが想定されるため, ペDESTAL部での電子密度勾配は小さくなり, 電子温度が上昇するというJINTRACコードによるシミュレーション結果がある。DIII-D及びNSTXでは, リチウム入射実験により, ペDESTAL部での電子密度勾配が減少し, 電子温度が上昇する結果が示され, ITERでの電子密度分布のペDESTAL構造について物理的な理解について進展が期待される結果が示された。

RMPによる不純物排気に関する議論が行われた。DIII-Dでは, レーザーブローオフによってタングステンを入射する実験が行われた。通常のELMy Hモードプラズマでは, タングステン入射後に主プラズマにおける放射損失パワーが増大し, 中心部の電子温度の低下が観測されたが, RMPによりELMが抑制された放電では, 放射損失パワー及び中心部の電子温度に変化が見られず, RMPによってタングステンが効果的に排気されているという実験結果が示された。

水素同位体効果に関する議論が行われた。AUGでは

LH遷移パワーに対する軽水素・重水素割合の影響を調べる実験が行われた。軽水素割合が50%以下ではLH遷移パワーが変化せず, 軽水素割合が100%付近まで増加するとLH遷移パワーが約2倍になるという実験結果が示された。この結果はJETでの同様の実験結果と異なり, なぜこのような相違が見られるのかについて今後さらに解析を進めていく予定である。

本会合では, 本年1月のITPA調整委員会で示されたITER優先課題に関する議論が行われた。昨年にとまとめられたITERリサーチプランに基づき, 優先課題として挙げられたリストから周辺ペDESTAL物理TGに該当する研究項目の説明があった。各項目について現存の装置間比較実験の範囲を拡大するなどしてITERリサーチプランに取り組んでいく方針で合意した。

3. 「輸送と閉じ込め」

第23回となる本会合は32名(日本1名, 欧州5名, 米国2名, 中国21名, 韓国1名, ITER機構2名)が現地参加した。リモートでの参加者は20名だった。日本からはもう3名が現地参加の予定であったが, 台風による交通機関の運休によりリモートで参加した。会合では, イオン温度と電子温度の臨界勾配と分布硬直性, プラズマコア部の粒子ピンチの衝突周波数依存性, 周辺部の粒子供給とピンチ, 閉じ込めへのグローバル効果, 磁場の三次元効果, 同位体効果とLH遷移に関する共同実験, 第一原理に基づく輸送モデルとシナリオのセッションが設けられ, そのうち磁場の三次元効果と同位体効果については, 周辺ペDESTAL物理トピカルグループと合同でセッションが組まれた。これらのセッションに加えて, ITERリサーチプランを受けた本トピカルグループの重要タスクや, 自発回転に関するセッションの再編成について議論が行われた。

イオン温度と電子温度の臨界勾配と分布硬直性のセッションでは, DIII-Dでの分布の硬直性の異なるプラズマを用いたジャイロ運動論コードGYROとジャイロ流体モデルTGLFの検証, AUGのEC加熱放電を対象にした電子温度勾配不安定性の影響, 高速イオンの乱流安定化のメカニズムについて報告があった。セッション議長から, 加熱装置がEC加熱のみのITER Pre-Fusion. Power Operation 1フェーズでの輸送予測に向けて, 電子温度とイオン温度の比 T_e/T_i が異なる装置においてデータを集約する指針であることが示された。

プラズマコア部の粒子ピンチの衝突周波数依存性のセッションでは, 日本からJT-60Uの密度ピーキングに対するスケーリング, ジャイロ運動論コードGKWを用いた軽水素及び重水素プラズマの密度分布特性について報告された。EASTからELM制御用のペレット入射実験の結果と, 最近, ペレット入射周波数を10 Hzから50 Hzに改良したことが報告された。

周辺部の粒子供給とピンチのセッションは, 周辺での密度分布について粒子供給と粒子ピンチの観点から, DIII-DやAlcator C-Mod等との装置間比較研究や, モデルとの比較研究を進めている。DIII-Dでは, ELM間の重

水素イオン密度の上昇は、電子密度や炭素イオン密度に比べて早く回復しており、今後粒子供給に着目した詳細な解析が行われる。

磁場の三次元効果のセッションは、一部を除き周辺ペデスタル物理トピカルグループと合同で開催された。本グループのみのセッションでは、Wendelstein 7-Xでのプラズマ閉じ込めに対する回転変換（安全係数の逆数）依存性、DIII-Dにおける摂動磁場印加時のLH遷移、AUGでの摂動磁場とペレット入射の共存性が報告された。

サマリーセッションでは、議長からITERリサーチプランを受けた本トピカルグループの重要タスク項目が示された。また、ITER機構からの副議長がA. Loarte氏からJ. Snipes氏に代わるアナウンスがあった。

4. 「統合運転シナリオ」

今回は統合運転シナリオ (IOS) TGの第23回目の会合で、マックス・プランク・プラズマ物理研究所で開催された。欧州17名（内、TV会議参加4名）、米国7名（内、TV会議参加4名）、韓国2名（内、TV会議参加1名）、中国1名（TV会議参加）、ITER機構3名が参加した。今回は日本からの参加者はいなかった。

IOS TGは、ITERの運転シナリオに関する課題について議論し、参加極における関連研究を通じて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。IOS TGから提案しているITER運転シナリオの開発に関する国際共同実験やモデリング活動の進捗の報告と議論、新たな共同取り組み課題の提案、運転シナリオモデリングに関する発表と議論などが行われた。特に、ITER機構が解決を求めているR&D課題に対する、既存のJoint Experiment (JE)、あるいは、Joint Activity (JA)での対応と、新規取り組みの立ち上げに関する議論が多く時間を割いて行われた。また、本会合ではMHD安定性TGとの合同セッションが半日あり、両TGの共通課題と、それを解決するための今後の共同活動を議論した。

各JEの進捗状況の報告があり、今後の計画について議論された。ITER標準運転シナリオにおいて不純物入射により閉じ込めを維持してダイバータ熱流束を低減する手法の開発に関しては、JETで C_2D_4 を入射した実験結果が解析中であること、DIII-DではXeとKrを入射する実験が予定されていることなどが報告された。ヘリウムが入ったHモードプラズマ特性の装置間の比較については、EASTから、ヘリウムが75%以上では約6MWのRF加熱パワーではHモード遷移が困難であったこと、ヘリウムが60%程度より高い場合と低い場合でELMの性質が変わり（低い場合で大きなELM、高い場合で小さなELM）、ヘリウムがペデスタル特性に影響していることを示す結果が得られたことが報告された。ヘリウムが入ったHモードプラズマの特性については今後周辺ペデスタル物理TGと共同で比較実験を進めることになった。

IOS TGに関連した各装置での実験に関する報告では、DIII-Dにおいてプラズマ電流に対して同方向/逆方向に可変入射可能な周辺入射用NBの運転を開始し、周辺入

射用NBパワーが4MWから9MWに増加したこと、プラズマ上部からECを共鳴面に沿うように入射する導波管が整備され運転を開始したことなどが報告された。これらを用い、前者に対しては、NB駆動電流分布を解析し、小半径の50%程度にピークを持つ周辺電流駆動がされNUBEAMコードと10%の精度で一致することを確認した結果が、後者に対しては第2高調波のXモードで入射したところ高速なテール電子を加速することで従来の弱磁場側入射よりも多くの電流を流すことができた結果が報告された。JETからはITER類似壁での3MAプラズマのディスラプション率を2015-2016年時の60%程度から20%程度まで低減させることができた結果が報告された。これは加熱停止時にNBパワーをゆっくりと落としてLモードへの遷移を遅らせたこと、コアの不純物制御のために5MW以上のイオンサイクロトロン加熱パワーを維持したことが重要であると報告された。

各JAの進捗状況の報告があり、今後の計画について議論された。ITER運転初期の非放射化フェーズの運転シナリオのモデリングのJAでは、プラズマ電流5MA/トロイダル磁場1.8TでのHモード運転の成立性を前回のIAEA核融合エネルギー会議で報告し、今後はITER機構のR&D課題への対応を考慮して第3高調波のEC加熱のコード検証および既存実験データを用いた妥当性確認と、輸送と閉じ込めTGと協力して輸送モデルの妥当性確認を行う予定である。プラズマ着火モデリングのJAでは、参加している3つのコード(BKD0, DYON, SCENPLINT)のKSTAR実験データを用いた妥当性確認で、Ohmicでは確認できたがECを入射した場合は不純物モデルの差で違いが現れることが報告された。今後は渦電流やプラズマ体積拡大等のモデル改良を行う予定である。

統合モデリングコードは、JEの実験結果を解析して用いている物理モデルを検証するだけでなく、JAで行うITERプラズマ性能予測・制御検討に欠かせないツールである。しかし最近、それらの統合コードを用いたグループ内の活動の低下が懸念され、人的資源の減少に原因があること、改善するためにITER機構の統合モデリング解析ツール(IMAS)の有効活用や、特定のJEとJAに人的資源を集中させること等が議論された。IMASの利用に関しては、各装置の実験データのIMASに基づくデータベースへの登録を進め、少なくともIMASの入出力機能を統合コードに整備して、予測の信頼性を保証するために複数の実験データと複数のコードを用いてモデルの開発・検証を効率的に行う必要がある。

次々回会合は、IAEA核融合エネルギー会議の後に開催し、高エネルギー粒子物理TGと共通課題を議論する合同セッションをもつ予定であり、次回会合ではその準備のための議論を行う予定である。

5. 「MHD安定性」

第34回となる本会合には、日本1名、欧州23名、米国11名、中国5名、ロシア1名、韓国1名、ITER機構2名が参加した(TV会議参加を含む)。今回の会合では、

逃走電子に関連したセッションが1日分設けられた。また、統合運転シナリオTGとの合同セッションが設けられ、逃走電子(上記とは別)とディスラプション回避のための制御に関して議論が行われた。

既存の装置での実験結果も紹介された。JETでは1系統の粉碎ペレット入射(SPI)装置を設置し、今年7月と9月に実験が行われ、11月にも実験が予定されていることが説明された。初期結果であるが、SPIは大量ガス入射(MGI)と同程度の効果であるとの報告があった。KSTARでは、1系統目のSPI装置が設置され、2系統目の設置と実験が今後行われることが説明された。また、SPI装置の導入に合わせて、赤外線センサーやボロメータが新設される予定であり、さらにディスパージョン干渉計や高速カメラが設置される予定があることも説明された。

逃走電子に関して、逃走電子が発生しているときには数100 MHz帯の磁場揺動が観測されることがAUG, DIII-D, FTU, KSTARから報告された。また、DIII-Dのデータにおいて、揺動がホイスラーモードであると仮定すると逃走電子の成長率や減衰率が実験値と理論値でよく合うことや、外部からこの周波数帯の電磁波を入射することで逃走電子を解放(deconfinement)することができる可能性があることが説明された。

ロックトモードが発生するとディスラプションに至ることがこれまで複数の装置で観測されている。JETのITER類似壁における約900のディスラプション放電を解析した結果、ディスラプション直前の磁場揺動強度の時間発展は様々であり、また、ロックトモードを検知してからディスラプションに至るまでの時間にはばらつきがあり、100 ms以上続く場合も多くあるとの報告があった。

プリンストン大学プラズマ物理研究所では、DECAF (Disruption Event Characterization and Forecasting) と呼ばれるツールを整備している。DECAFでは、磁場揺動の強度や周波数やモード数などを自動で解析し、事象を分類することで、ディスラプションに至る事象の連鎖を解析することができる。過去の会合で、NSTXのデータを使った解析例が示された。今回の会合ではDECAFをKSTARに適用した結果が報告され、NSTXの場合と同様に、警告レベルが増加した後にディスラプションに至ることが示された。

ディスラプション回避の例として、AUGにおける高密度Hモード実験が説明された。AUGでは、同実験においてHファクタと電子密度の平面にディスラプションの境界を設定し、実時間でこの空間上の値を評価し、境界を越えそうになったときにEC加熱を行うことによりディスラプションを回避した。同様に、NBを使っても成功したことが説明された。

共同実験等に関して議論して結果、逃走電子と電磁波との相互作用に関する共同実験を新規に立ち上げることにした。また、ディスラプション回避に関連して、IOS TGと共同で共同実験を立ち上げることにした。また、ITERにおけるELMと抵抗性壁モードの同時制御に関するワーキンググループ活動を周辺ペダスタル物理TGと共同で立ち上げることにした。

今回の会合は日米MHDワークショップと共同で開催することで合意した。また、次々回の会合はIAEA核融合エネルギー会議の次の週にITER機構本部で開催することにした。

(原稿受付日：2019年12月18日)