

■ ITPA(国際トカマク物理活動)会合報告(62)

分野: 「高エネルギー粒子物理」¹, 「周辺ペデスタル物理」², 「輸送と閉じ込め物理」³

開催日: 2017年9月11日ー9月12日¹,
2017年9月18日ー9月21日^{2, 3},

場所: プリンストン(米国)¹,
エスボー(フィンランド)^{2, 3}

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(量研機構)¹, Andreas Bierwage(量研機構)¹, 村上定義(京大)¹, 山本聡(京大)¹, 相羽信行(量研機構)², 浦野創(量研機構)², 神谷健作(量研機構)², 大山直幸(量研機構)², 鈴木康浩(核融合研)², 中嶋洋輔(筑波大)², 森崎友宏(核融合研)², 井戸毅(核融合研)³, 今澤良太(量研機構)³, 田中謙治(核融合研)³, 田村直樹(核融合研)³, 本多充(量研機構)³, 宮戸直亮(量研機構)³, 吉田麻衣子(量研機構)³

(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
高エネルギー粒子物理	2018年5月23-25日	ITER 機構 (フランス)
周辺ペデスタル物理	2018年4月4-6日	ストックホルム (スウェーデン)
輸送と閉じ込め物理	2018年4月9-11日	デジョン (韓国)

1. 「高エネルギー粒子物理」

第18回となる本会合は, 米国のプリンストンプラズマ物理学研究所 (PPPL) にて「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」に引き続き開催された。参加者はリモート参加も含め約25名, 22件の発表があった。

はじめに, ITERの進捗状況の説明として, 建設の現状が報告された。4月の報告後も大きく進展していた。また, 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, エッジローカライズドモード (ELM) 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 EP6 では, RMP の影響について ASDEX-U (AUG), DIII-D, KSTAR の4月以降の解析の進捗が報告された。また, AUG より ELM 時に中性粒子ビーム (NB) の入射エネルギーよりも大きいエネルギーをもった高速イオンの損失が観測されたという報告があった。不安定性も考慮した NB 電流駆動の検証を扱う EP8 では, 不安定性がない時は, 従来の理論モデルで説明できるという流れであったが, 一部それに反対する意見があり, 再度レビューを行い確認することとした。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, 高速イオンがほぼ存在しないオーミックプラズマでも観測された旨報告され

たり, ICE の強度が NB のパワーよりも NB のエネルギーに強く依存するという報告があったり, これまでのモデルで解釈されない事例が報告された。ICE の計測器への応用はこれら新たな報告の物理機構の理解が不可欠である。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, JET における該当放電で観測されたアルヴェン固有モード (AE) の解析結果が報告された。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 では, DIII-D と AUG より速度分布の再構築に関する報告があった。また, ITER のアルファ粒子計測への適用が提案され, 報告された。γ線計測と共同トムソン計測 (CTS) を組み合わせたものであった。1.7 MeV 以上では, 非等方な速度分布もある程度再現できるが, 1.7 MeV 未満では等方性を仮定する必要がある旨報告された。非等方性を扱えるようにするには複数視線の CTS 計測が必要であるが, 残念ながら ITER に導入する余地はない。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, これまでの電子サイクロトロン波 (EC) 入射と RMP による AE への影響の報告があった。LHD の最近の重水素実験での結果も報告された。EC により AE が観測されなくなったが中性子発生量は変化していないという結果であった。

本トピカルグループにおける ITER への貢献としては, モデリング活動が重要な位置を占めている。新たなモデリングベンチマーク活動として, ベータ駆動アルヴェン固有モード (BAE) とベータ駆動アルヴェン音響波固有モード (BAAE) を対象としてコード間ベンチマークを実施することを4月の会合で決定したが, 3件の現状報告があった。また, Nuclear Fusion 誌で2007年に出版された ITER Physics Basis の改訂の進め方を議論した。

今回は, ITER 機構にて ITER 内の計測グループを交えて5月末頃に行うこととなった。

2. 「周辺ペデスタル物理」

本会合には24名(欧州9名, 米国11名, ITER 機構1名, 日本1名, 韓国2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) H モードペデスタル構造の理解, (3) LH 遷移の発生条件, (4) 3次元磁場の効果等に関する討議が行われた。

ITER の ELM 制御コイルに関する第22回 ITER 科学技術諮問委員会 (STAC-22) での報告事項が説明された。真空容器内コイルの設計・調達に加え, 機器の安全限界, 損壊, 熱応力の解析状況が報告された。コイル冷却水と真空容器の温度差によるコイルへの熱応力を低減させるためのスライディング保持手法を検討しており, ITER 機構では, スライディング保持された半分のサイズの ELM 制御コイルを作成し, 熱水下での熱変形試験を実施した。STAC はスライディング保持脚の検討を継続し, 真空中において想定される温度での試験を実施することを勧めた。また, STAC は ELM 制御コイルを低プラズマ電流側から段階的に15 MA 放電に向けて開発する ITER リサー

チプランのアプローチを承認した。さらに初期運転フェーズ (PFPO-1) では、9 個のコイルを用いた初期試験を行う計画を承認したとの報告があった。

RMP コイルによる ELM 制御のワーキンググループでは、AUG, DIII-D, EAST, KSTAR での実験によって、ITER の低衝突周波数領域を含む広い運転領域での RMP による ELM 制御手法を確立したという報告があった。KSTAR 及び DIII-D では、共鳴高調波の浸透による ELM 緩和から ELM 消失への遷移が発生するという実験結果が示され、理論的には ELM による周辺部の摂動が ELM 消失状態への遷移をトリガーするという報告があった。複数の装置による実験結果から、RMP による ELM 消失には、プラズマ形状、トルク、周辺安全係数が重要なパラメータであることが示唆された。

ペデスタル構造のワーキンググループでは、ITER のペデスタル構造予測に取り組んでおり、15,000 ケースの EPED モデル計算を実施し、20% 以内の精度でペデスタルを予測できることを示した。He プラズマでの予測を行い、重水素に比べて燃料希釈が発生する一方で、ペデスタル温度が上昇し、ペデスタル圧力には大きな差異が現れない解析結果を示した。最近の C-Mod での実験では、peeling-ballooning モードの中間トロイダルモード数付近の最も圧力勾配が高くなる領域で運転する Super H モードへのアクセスに成功し、約 100 kPa の非常に高いペデスタル圧力を得たという報告があった。

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。ここで、リップルについて各装置の検討結果をまとめると、ITER 初期運転フェーズで想定される 1.3% のリップルでは、LH 遷移パワーに大きな影響を与えないことが示唆された。また、C-Mod で電流ランプ率に対する LH 遷移パワーを調査したところ、広い電流ランプ率に対して、LH 遷移パワーは変化しないことが示された。最も不確定性が大きい問題は、ダイバータ配位による LH 遷移パワーへの影響であり、今後も国際装置間比較実験を通じて調査していく予定であるという報告があった。

3. 「輸送と閉じ込め物理」

第 9 回となる本会合には 41 名 (日本 3 名、欧州 21 名、米国 10 名、中国 2 名、韓国 2 名、ロシア 1 名、ITER 機構 2 名、リモートも含む) が参加した。会合は、プラズマの自発トルクと自発回転、プラズマ周辺部における粒子供給と粒子ピンチ、LH 遷移、イオンと電子の臨界温度勾配と分布の硬直性、周辺部の shortfall 問題、ITER プラズマシミュレーション、ITER データベースのアップデート、3 次元磁場効果、ITER Physics Basis のアップデート、今後の ITPA 活動予定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。最後に、議長から今後の ITPA 活動予定が示された。プラズマ周辺

部における粒子供給と粒子ピンチと LH 遷移のセッションは、ペデスタル物理トピカルグループと合同で開催した。

プラズマの自発トルクと自発回転では、それぞれ装置間比較実験、データベースの構築、モデリングとの比較が行われている。自発トルクのジャイロ半径依存性について、JET, DIII-D, ASDEX Upgrade, TCV に加えて KSTAR のデータが加わるようになった。ITER 予測のための自発トルクの規格化についての議論があった。ASDEX Upgrade のオーミック L-mode 時に観測されている下に凸の回転分布は、Gyro Kinetic Workshop (GKW) コードにより良く再現できることが示された一方で、平坦な回転分布の再現は難しいことが示された。

プラズマ周辺部における粒子供給と粒子ピンチでは、JET においてガスパフ変調実験と X 点掃引から粒子源の解析とモデリングとの比較が進められている。C-Mod では最終実験キャンペーンで、高密度 H モード (セパトリクスの密度が $1 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$) のデータを取得することができ、今後粒子ピンチなどの解析を行うことが報告された。JET や DIII-D プラズマの周辺部は、熱輸送についてマイクロテアリングモード (MTM) や電子温度勾配不安定性 (ETG) が支配的になり得、粒子輸送については、運動論的バルーニングモード (KBM) やイオン温度勾配不安定性 (ITG) が支配的になり得ることが報告された。

イオンと電子の臨界温度勾配と分布の硬直性のセッションでは、高速イオンと電磁揺動の効果をジャイロ運動論コードに導入した計算について広く発表があった。NB とイオンサイクロトロン周波数帯 (ICRF) によってそれぞれ加熱された重水素とヘリウム的高速イオンに対して非等方速度分布関数を与えることで、より実験観測結果に近い熱流束が予測できることが報告された。また、ジャイロ運動論コードから示されている電磁揺動によるイオン熱輸送の抑制効果を再現する準線形モデルが紹介された。

shortfall 問題については、これまでジャイロ運動論コード間のベンチマークで GYRO から得られる熱流束が他のコードと比較して低く、実験値を大幅に過小評価していたが、座標系を変更した CGYRO の開発によって結果が改善することが示された。座標系の変更に伴い、ジャイロ流体モデル TGLF の較正に用いられてきた GYRO の結果に見直しが必要であることが報告された。

3 次元磁場効果では、DIII-D においてはダイバータへの熱束の均質化と ELM の抑制の両立を目指した RMP コイルの電流の変調実験の報告があった。COMPASS での RMP 実験の初期結果や、EAST での RMP 印加時の密度変調による粒子輸送評価、KSTAR での共鳴、非共鳴 RMP の輸送に関する評価が報告された。TJ-II と LHD から同位体効果の三次元効果という観点で報告があり、ヘリカルではトカマクに比べて同位体効果による重水素での閉じ込め改善は明確でなかった。コア領域の捕捉電子不安定性の衝突周波数依存性の違いについてシミュレーションと乱流計測の比較が報告された。セッションリーダーより周辺をエルゴディックにした場合の閉じ込め改善に

ついて更なる実験が期待されとのコメントがあった。

最終日は、装置間比較実験の進捗と、今後の ITPA 活動予定について報告と議論がなされた。成田 (QST) からは、JT-60 実験データを用いた粒子束のジャイロ運動論モデリングに関する結果と今後の見通しを報告するとともに、次回予定しているニューラルネットワークシミュレーションモデルの開発のセッションに向けて課題を提供した。Mantica 議長からは、現在までに完了した研究項目と未完の項目が示され、今後の方針について議論がなされた。ITER Physics Basis に関しては、主著者と共著者の選定がなされ、ITPA 調整委員会での承認待ちである。尚、任期満了に伴い本グループの議長 P. Mantica 氏は次の議長（近日中に決定）に交代する。

（原稿受付日：2017 年 11 月 6 日）