

■ ITPA(国際トカマク物理活動)会合報告(61)

分野:「輸送と閉じ込め物理」¹,「計測」²,「スクレープオフ層とダイバータ物理」³

開催日: 2017年5月1日-5月3日¹, 2017年5月9日-5月12日², 2017年5月30日-6月2日³

場所: プリンストン・プラズマ物理研究所(米国)¹, 西南物理研究所(中国)², ヨーク大学(英国)³

担当委員:

井戸毅(核融合研)¹, 今澤良太(量研機構)¹, 田中謙治(核融合研)¹, 田村直樹(核融合研)¹, 本多充(量研機構)¹, 宮戸直亮(量研機構)¹, 吉田麻衣子(量研機構)¹, 秋山毅志(核融合研)², 石川正男(量研機構)², 磯部光孝(核融合研)², 伊丹潔(量研機構)², 江尻晶(東大)², 河野康則(量研機構)², ピーターソン・パイロン(核融合研)², 朝倉伸幸(量研機構)³, 芦川直子(核融合研)³, 上田良夫(阪大)³, 大野哲靖(名大)³, 坂本瑞樹(筑波大)³, 仲野友英(量研機構)³, 増崎貴(核融合研)³

(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
輸送と閉じ込め物理	2017年9月18-21日	VTT (フィンランド)
計測	2017年10月16日-20日	ITER機構 (仏)
スクレープオフ層とダイバータ物理	2018年1月30日-2月2日	西南物理研究所 (中国)

1. 「輸送と閉じ込め物理」

第18回となる本会合には33名(日本3名, 欧州14名, 米国13名, ITER機構1名, 韓国1名, 中国1名, リモートも含む)が参加した。諸事情により議長, 副議長2名の全員が現地参加しなかったが, 議長とIO副議長はリモートアクセスで参加した。会合は, ペレット入射時の遷移的状況における粒子輸送, 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, 準線形モデルの妥当性検証, LOC-SOC遷移の理解と現象論, 運動量・粒子ピンチの衝突率依存性, ITERデータベースのアップデート, 不純物輸送, ITER Physics Basisのアップデートに関するセッション, ITERリサーチプランの更新とT&Cに関連するモデリング研究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。最後に, ITER機構からITERでの重要な輸送研究項目の提示と, 議長から今後のITPA活動予定が示された。

初めにNSTX-Uの現状について報告があった。NSTX-Uとなり磁場が強化され, NSTX時の最長放電時間を4倍に延ばすことに成功している。新しく, 電流駆動を増やすため2つ目の接線NBが設置された。

ITERでは密度上昇のためのペレットを上手く制御しなければプラズマを冷やしHモードから逆遷移してし

まうおそれがあるため, ペレットを用いた研究が重要となっている。JETから, 軽水素プラズマに対する重水素ペレット入射実験の結果が初報告された。コアで重水素・軽水素密度比はおよそ0.35であった。DIII-DとEASTから, ペレットが引き起こすLH遷移の報告があった。ペレットによる正の密度勾配時のジャイロ運動論コードによる安定性解析の報告が2つあり, 通過粒子駆動の不安定性で, 衝突率とアスペクト比の増加によって不安定化され, 内向きの粒子束を作るとのことであった。

実時間計算を目指した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では, 欧州で進むQualiKizベースの研究と米国のOMFITフレームワークを用いたEPED-NNとTGLF-NNの報告があった。OMFITは計算デモが示され, GUIによる直感的な入力により1分程度のごく短時間でEPED-NNとTGLF-NNの結果と無矛盾な分布がTGyroによって計算される様子が大きな注目を集めていた。

LOC-SOC遷移のセッションでは Alcator C-Mod, ASDEX Upgrade, Tore-Supra から発表があった。異なる装置における異なるコードによる解析に基づく共通の理解として, LOCでは捕捉電子モードが, SOCではイオン温度勾配モードが卓越していることが分かった。

不純物輸送のセッションは最も多い7件の発表があった。DIII-Dからはon-axis ECHによってコアのタングステン蓄積を減らすことが出来るとの発表があった。ASDEX Upgradeでは, 中心に局在化したECHが最も効率良くタングステン蓄積を減らせるが, ICRHによる電子加熱パワーがECHと同程度であれば, ECHと同じ効果があると分かった。EASTでは鉄やモリブデンの蓄積をECHやRMPによって制御する試みが行われている。成田氏(量研機構)はJT-60Uにおいてジャイロ運動論コードによって不純物と輸送の関係を調べた結果を報告した。JETからも同様の報告があった。

IOからは, ITERの比較的初期における5 MA / 1.8 Tの段階でHモード遷移の検証とELM制御を行うとの発表がなされ, 軽水素プラズマにヘリウムを10%程度混ぜることにより, 遷移閾値パワーを削減する方針が示された。

今回の会合ではITER Physics Basisの改訂に関して深い議論がなされ, この10年間の輸送・閉じ込め分野における進展について分類する章立てと, 主著者, 共著者の選定が進められ, 大枠は概ね決定された。

2. 「計測」

第32回計測トピカルグループ(TG)会合が中国・成都の西南物理研究所にて開催された。本会合には, 約70名が参加した(日本4名, 中国45名, 欧州6名, インド4名, 韓国4名, ITER機構3名, 米国3名, ロシア3名, リモート含む)。主な内容を以下に記す。

2.1 ITERの計測における最重要課題への取り組み状況

①プラズマ対向第一ミラー寿命の評価

第一壁の損耗等によって生じた粒子がプラズマ対向ミラー上に薄膜を形成し, ミラーの反射率を低下させる

問題を解決するため、反射率回復を狙うミラークリーニングシステムの開発がバーゼル大学等で進められている。実機に近い条件の要素試験として、ミラーを電極として（ベリリウムと質量が近い）重水素プラズマを生成し、ベリリウム薄膜を取り除く実験が開始されたことが報告された。今後、ミラーの損耗を抑えながら薄膜を効率的に取り除く技術の発展が期待される。一方で、スイスのチューリッヒ大学では、荷電交換分光計測（CXRS）用のプラズマ対向第一ミラーを保護するための空圧駆動型シャッターのプロトタイプを製作し、長期間に渡る動作試験が実施された。その結果、100万回の繰り返し駆動動作を行っても損傷やリークが発生しないことが確認され、ITER適用への見通しがついた。

②壁反射光の光学計測への影響

本会合では、壁反射光の影響の評価に関する直接的な報告はなかったが、ITERでの光学計測の重要な課題の一つである光ファイバーに対する放射線照射試験の結果が報告された。ITERのCXRSに対して適用が検討されている数種類の純シリカ製ファイバーに対して、ベルギー原子力研究センター（SCK・CEN）でコバルト（ ^{60}Co ）を用いた高放射線量（700 Gy/h）及び低放射線量（50 Gy/h）環境下での照射試験が実施された。照射の結果、放射線照射による光ファイバーの光の吸収（Radiation Induced Absorption, RIA）が紫外領域から可視領域において特に強まることに加え、RIAは比較的低い放射線照射状態から急速に成長し50 Gy程度の放射線量でその影響が確認できること等、RIAに対するデータの蓄積が進められている状況が報告され、参加者の注目を集めた。

③損失アルファ粒子計測の検討

これまでに、様々な計測手法の候補の中からシンチレータを使用した高速イオン損失検出器（FILD）が、高時間分解能（ms単位での計測）の観点から最適であると結論付けられている。しかし、FILDのITERへの適用にはまだ多くの課題があり、まずは計測装置の開発の前に損失粒子の軌道計算を適切に行う必要があることが確認された。一方で、ASDEX Upgradeでは、FILDの設置が完了し、今後5台の検出器を用いて計測が進められていく計画が報告され、この結果によっては今後の大きな進展が期待される。

④プラズマ制御システムに関する計測要求

本会合では、初めてITER機構の安定/制御部門の技術担当者の参加があり、プラズマ制御システム（PCS）の制御装置の設計、検証及び妥当性評価を可能にするPCSシミュレーションのためのプラットフォームの整備等、ITER機構におけるPCS構築に向けた進展について報告が行われた。また、EASTにおいて、偏光計測及び干渉計測を組み合わせて、プラズマ密度測定や電流分布の実時間制御が進められている様子が報告された。

⑤新たな最重要課題への提案

ITPA計測TGの議長（D. Brower氏）より、ITERにおける各計測装置の較正試験の手法確立に関する課題を

新たに最重要課題として取り入れる提案が行われ、その詳細について次の会合で協議をしていくこととなった。

2.2 ITPA/IEA 共同実験に関する議論

以下に示す8件の共同実験の実施状況について議論を行った：第一ミラーの環境試験、トムソン散乱計測と電子サイクロトロン放射（ECE）計測により計測した電子温度データの乖離、放射化プローブの環境試験、エックス線結晶イメージング法と荷電交換再結合分光法の比較、壁反射光モデルのベンチマーク試験、マイクロ波ボロメータを用いたECH迷光パワー計測、スペクトル計測による動的シュタルク分光計測の妥当性検証実験、真空窓におけるマイクロ波吸収の最小化。このうち、「スペクトル計測による動的シュタルク分光計測の妥当性検証実験」に関する共同実験においては、DIII-Dでの実験の進展が報告された。モデリングに関するデータと合わせて、十分なデータが蓄積されたとして、今回の報告をもって本共同実験を完了させることで合意に達した。

2.3 各極の活動状況

会合初日に中国のプログレス会合が開催され、EASTやHL-2Aを中心に様々な計測装置開発の進展が20件以上報告された。今回の報告から、中国国内では計測装置の開発が活発に行われ、各トカマク装置の計測装置が充実している状況が確認できた。また、ITER機構からは、特にITERのファーストプラズマで設置を行う計測装置の設計、試作及び試験が精力的に行われている状況が報告された。真空容器内に設置する磁束ループにおいては、運転中に発生する信号ケーブルの熱膨張による座屈を避けるための配線を考慮した設置テストが進められ、実機製作及び組立に見通しが得られたことが発表された。また、米国やヨーロッパからは、各研究機関が設計・開発したITER用計測装置をDIII-DやJET、ASDEX Upgrade及びWEST等のプラズマ実験に適用し、積極的に性能評価や課題の抽出を行っている状況が報告された。さらに、ITPAの議題には挙がっていないものの、国を跨いだ共同実験も盛んに行われており、今後の各機器のさらなる開発が期待される。

2.4 日本からの報告

谷塚氏（量研機構）から、ITERの放射線環境を考慮して、真空容器内にターゲットを設置せずに遠隔で周辺トムソン散乱計測装置の集光光学系をアライメントする手法に関する検討が報告され、実現性の高さが注目された。梶田氏（名古屋大学）からは、LHDやKSTARにおける赤外イメージングビデオボロメータの設計の進展など、第一壁専門家ワーキンググループの活動状況が報告された（梶田氏は、同ワーキンググループの議長）。石川氏（量研機構）からは、JT-60SA及び日本が調達するITER計測装置の開発状況について報告があった。

3. 「スクレイプオフ層とダイバータ物理」

第24回目となる本会合はヨーク大学（英国）で開催

された。本会合への参加者は50名で、このうち日本人は2名であった。発表件数は47件であった。今回の会合では、ITER リサーチプランの改訂の概要報告から始まり、国際装置間比較実験の成果（デタッチメント、三次元非軸対称効果、不純物入射、プラズマ対向壁、不純物の長期的輸送、ELM間の熱流束幅と内・外ダイバータ非対称性、ベーパーシールドディング、ダスト、ELMによるモノブロック間のトロイダル・ポロイダルギャップへの熱負荷と過渡的溶融）について報告され、さらにITER Physics Basis の Nuclear Fusion 誌特別号の執筆内容についての議論がなされた。

デタッチメントのセッションでは、JET から H モード・プラズマに N_2 を注入した場合の分光測定結果の詳細な報告があった。 N_2 注入量を徐々に増加させると次第に外側ダイバータ板へのイオンフラックスが減少した。このとき、 NII 発光のピーク位置は N_2 注入量の増加とともに X 点に向かって移動し、その移動が終わった後、 D_γ/D_α 比で示す再結合フロントが移動を開始し NII 発光のピーク位置を越えて X 点により近い位置（上流側）まで移動した。

三次元非軸対称効果のセッションでは、RMP コイルによる摂動磁場を回転させた場合の効果が DIII-D と EAST から報告された。どちらの装置でも摂動に由来する熱負荷のローブ構造が周回方向に回転し熱負荷が平均化されたが、RMP の本来の目的である ELM の抑制・制御は摂動磁場を回転させた場合には困難であるとの見解が示された。

不純物入射のセッションでは、前回の会合で ASDEX Upgrade から報告された HFSHD (X 点の高磁場側に発生する高密度領域) の挙動について、Alcator C-Mod から比較実験の結果が報告された。ASDEX Upgrade での観測とは逆に Alcator C-Mod では N_2 注入量を増加させると HFSHD の密度が減少したことが報告された。一方で、HFSHD 発生時に観測される X 点近傍の放射パワーの周期的な変化は Alcator C-Mod でも観測されたことが報告された。

JET から、ダストの発生量や可動性について、ディスラプション直後のトムソン散乱測定信号の解析によって得られた結果が報告された。また JET におけるダストや ITER における Be 液滴の輸送について、DTOKS コードや MIGRANe コードを用いた解析・予測結果について報告があった。今後はダストの発生メカニズムもしくはスケールング則についてより詳細に調査する必要があることが議論された。伊庭野氏(阪大)からは PIC と伝熱計算を組み合わせたベーパーシールドディング効果のシミュレーションが報告された。菊池氏(兵庫県立大)らによるプラズマガン装置を用いた実験結果との比較によると、観察されたプラズマ冷却効果を説明するためには、流入イオンと発生蒸気の弾性衝突によるエネルギー散乱を考慮する必要性が示された。

プラズマ対向壁のセッションでは、リ氏(阪大)が不純物を含んだタングステン材中の水素同位体の透過特

性について報告した。3%の窒素がタングステン材に含まれている場合には重水素の透過率が1桁以上増加するが、1%のヘリウムが含まれている場合には1桁減少し、またネオンやアルゴンの場合には低温の場合(550 K 以下)を除いて減少することを示した。ITER においてもトリチウムの透過が重要であれば、モデリングに含めていく必要性が指摘された。また、タングステンを透過し銅との接合境界で水素同位体が蓄積すればタングステンモノブロックの冷却性能に影響を与えうるとの懸念が示された。

ELM 間の熱流束幅のセッションでは、Eich-Goldston スケーリングと実験データ、gyrokinetic コードによるシミュレーションデータとの比較が行われた。スケールリングでは熱流束幅はポロイダル磁場強度の1.19乗に反比例して減少する。Alcator C-Mod では、これまで他の装置では実施できていなかった ITER 条件に近い高いポロイダル磁場強度での実験を行い、熱流束幅がスケールリングにほぼ従うという観測結果が報告された。一方、gyrokinetic シミュレーションでは ITER の熱流束幅はスケールリングに比べてかなり大きくなるとの予測が示された。ITER では稼働中のトカマク装置に比べて最外殻磁気面近傍における電場の勾配が小さく、そのため乱流の様相も異なり、blob による輸送が大きくなり(streaming と呼ばれていた)熱流束幅が広がるということである。このような輸送の変化は装置サイズとして JET では小さ過ぎて起きず、JET から ITER の間で起こりえるとのことであり、JT-60SA における実験に期待するとのことであった。また、本セッションでは COMPASS における ELM 時の熱流束幅も、ポロイダル磁場が強くなると小さくなるという観測結果が紹介された。

ELM によるモノブロック間のトロイダル・ポロイダルギャップへの熱負荷のセッションでは、イオンの軌道計算およびPICコードにより、イオンのラーマ運動を考慮した熱負荷計算結果が示された。ITER の burning nuclear scenario の条件では、ELM によりモノブロックのエッジ部、コーナー部、そして表面でも溶融が起きる可能性が示された。磁場強度が低い pre-nuclear scenario においても、エッジ部は溶融する可能性が指摘された。また、KSTAR と COMPASS におけるギャップ部への熱負荷計測結果、KSTAR における新たな実験計画が紹介された。

ELM によるタングステンダイバータ板の過渡的溶融のセッションでは、溶融層挙動の予測が可能な MEMOS コードの妥当性検証のため、JET および AUG で実施されたタングステン溶融実験について報告された。溶融層挙動には熱電子放出による電流と磁場による $J \times B$ ドリフトが強く影響するという観測結果が得られているが、熱電子放出による電流の他にも何らかの電流が流れている可能性が示唆された。

(原稿受付日：2017年7月10日)