

## ■ ITPA(国際トカマク物理活動)会合報告(68)

分野：「MHD 安定性」<sup>1</sup>，「計測」<sup>2</sup>，「周辺ペDESTAL物理」<sup>3</sup>，「統合運転シナリオ」<sup>4</sup>

開催日：2018年10月1日～3日<sup>1</sup>，10月8日～11日<sup>2</sup>，10月29日～31日<sup>3,4</sup>

場所：ナポリ（イタリア）<sup>1</sup>，サン・ポール・レ・デュランス（フランス）<sup>2,3,4</sup>

担当委員：

諫山明彦(量研)<sup>1</sup>，榊原悟(核融合研)<sup>1</sup>，白石淳也(量研)<sup>1</sup>，古川勝(鳥取大)<sup>1</sup>，政宗貞男(京都工繊大)<sup>1</sup>，松永剛(量研)<sup>1</sup>，渡邊清政(核融合研)<sup>1</sup>，秋山毅志(核融合研)<sup>2</sup>，石川正男(量研)<sup>2</sup>，磯部光孝(核融合研)<sup>2</sup>，ピーターソン・バイロン(核融合研)<sup>2</sup>，伊丹潔(量研)<sup>2</sup>，江尻晶(東大)<sup>2</sup>，河野康則(量研)<sup>2</sup>，相羽信行(量研)<sup>3</sup>，浦野創(量研)<sup>3</sup>，神谷健作(量研)<sup>3</sup>，大山直幸(量研)<sup>3</sup>，鈴木康浩(核融合研)<sup>3</sup>，中嶋洋輔(筑波大)<sup>3</sup>，森崎友宏(核融合研)<sup>3</sup>，林伸彦(量研)<sup>4</sup>，鈴木隆博(量研)<sup>4</sup>，坂本宜照(量研)<sup>4</sup>，長崎百伸(京大)<sup>4</sup>，花田和明(九大)<sup>4</sup>，藤田隆明(名大)<sup>4</sup>，横山雅之(核融合研)<sup>4</sup>

（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      | 2019年4月1日～3日  | デジョン<br>(韓国)       |
| 計測          | 2019年4月8日～11日 | キャンベラ<br>(オーストラリア) |
| 周辺ペDESTAL物理 | 2019年4月9日～11日 | デジョン<br>(韓国)       |
| 統合運転シナリオ    | 2019年4月9日～12日 | 那珂<br>(日本)         |

### 1. MHD 安定性

第32回となる本会合には，日本1名，欧州26名，米国8名，中国6名，ロシア3名，インド1名，韓国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）。今回の会合では，ITERにおける検討の進捗のほかは，主に「非対称VDE及びディスラプションによる電磁力負荷」（VDE: Vertical Displacement Event）と「ディスラプション予測」のトピックスに絞って発表が行われ，その結果について参加者で議論した。

ITERのディスラプション緩和システム（DMS）では，これまで，斜め上ポートに3箇所，水平ポート1箇所に設置されると説明されていたが，本会合で，水平ポートに2箇所追加した計6箇所が検討されているとの説明があった。この場合，テスト・ブランケット・モジュールのポートを使用することになるので，ITER理事会での承認が必要との説明があった。また，DMSにおいて，1つの入射口に3つのペレット生成装置（「バレル」と呼んでいる）が装備されたシステムがこれまで想定されていたが，設置スペースの関係上，1入射口あたり1バレルの

システムが現在考えられていることが説明された。また，DMSの開発を加速するために2018年初めにタスクフォースを立ち上げることになり，実験，工学，理論/モデリングの検討が進められていることが説明された（日本からは量研の松山氏が参画）。

既存装置の粉碎ペレット入射（SPI: Shattered Pellet Injection）実験の状況についても説明があった。JETではSPI装置の据え付けが進められており，10月にコミッショニング，12月に実験が2週間予定されていることが説明された。また，KSTARにおいて，トロイダル方向に180度離れた位置にSPI装置を設置する計画があり，ORNL製のSPI装置が2019年，2020年に導入される予定との説明があった。

非対称VDEに関連して，EAST（中国）の真空容器，真空容器内機器，コイル，ポートなどの3次元情報をCARMA0NLの入力として用いてイタリアのConsorzio CREATEチームが計算した結果が説明された。プラズマ平衡の時間発展がEFITコードの結果とよく合うことが確認できた。また，ハロー電流は，真空容器→支持材→ヒートシンク→別の支持材→別の真空容器位置と複雑な経路で流れることがわかった。さらに，真空容器を流れる電流は計測値とおおむね一致することが示された。

ディスラプション予測に関連して，DECAF（Disruption Event Characterization and Forecasting）と呼んでいる解析手法の結果が報告された。これは，ディスラプションに至る過程を，抵抗性壁モード（RWM），VDEなどの現象に分類し，それぞれにおいて閾値を実験的に定めて予測する解析方法である。このほか，磁場揺動強度・周波数を自動で解析し，複数モードの発生からロックモードに至る過程を解析した例も紹介された。また，同様の解析をNSTX，KSTAR，MASTで行っており，現象及び適用装置を拡大する予定との説明もあった。

DIII-Dから，実時間MHD安定性解析に向けた結果が報告された。実験データから自動で評価された圧力・電流分布及び平衡から理想MHD安定性限界やテアリングモード安定性を計算した例が紹介された。現状では計算時間は0.5秒以下であるが，計算機性能を向上する予定であるとの説明があった。

JETからは，ITER-like wall（ILW）の下でのディスラプション検出の結果が報告された。ILWとした後ではディスラプション発生率は10～25%程度で推移しており，運転領域を拡大する実験の際には発生率が高くなるとの説明があった。また，検出したディスラプションのうち，55%がロックモードに起因するものであることや，約40%の放電では電流クエンチ開始後に大量ガス入射のトリガが発信されているとの報告があった。

共同実験・ワーキンググループ活動では，ハロー電流のモデリングを行うワーキンググループ活動が終了することになったほかは継続することになった。

### 2. 計測

第35回計測トピカルグループ（TG）会合がフランスのITER機構にて開催された。本会合には，約65名が参加

した（内訳（含遠隔参加）／日本1名、韓国5名、米国4名、EU22名、ロシア8名、中国4名、インド1名、オーストラリア1名、ITER機構17名）。主な内容を以下に記す。

ITERでは、プラズマ対向壁材料（ベリリウム、タングステン等）の金属微粒子が光学計測用プラズマ対向第一ミラーに堆積して運転期間中に反射率が劣化することが計測の最重要課題の1つとなっている。この対策として、計測用金属ミラー周辺にガスを封入し、ミラーを電極として容量結合プラズマを生成することによるミラークリーニング機構の開発が世界的に進められている。パーゼル大学から、従来よりも低いイオンエネルギーを持つ容量結合プラズマを生成できるようになり、ミラーの材料であるロジウムやモリブデンと比較して主な堆積物であるベリリウムのスパッタ率を数桁高くすることができるようになったとの報告があった。また、分光計測により堆積物及びミラー材料の線スペクトルを観測してクリーニングの終了を検出する機構も検証された。

グループで行っている共同実験の実施状況について議論した。エクス線結晶イメージング法（XICS）と荷電交換再結合分光法（CXRS）の比較実験では、KSTAR及びEASTでの3年間の精力的な活動の末、トロイダル回転速度とイオン温度共に、XICSとCXRSの測定結果が良く一致することが確かめられ、同テーマの共同実験は完了した。ガンマ線制動放射分光による逃走電子のエネルギー分布計測に対する共同実験では、DIII-Dでアルゴンペレットを入射して発生させたディスラプション時に逃走電子の最大エネルギーが閾値を超えると数 MHz のMHDモードによって逃走電子ビームが減衰されることが示されるなど物理研究に役立つデータが得られている。ASDEX Upgradeでは高時間分解能ガンマ線制動放射分光が整備され、実験を開始したことが報告された。また、JETでも新しいガンマ線計測装置が試運転中であり、2018年12月頃から逃走電子の研究に使用される予定との報告があった。

会合初日にEU及びITER機構のプログレス会合が開催され、ITERの磁気計測、中性子カメラ、協同トムソン散乱計測、ボロメータによる放射計測、CXRS、マイクロ波反射計、可視赤外広角カメラ、圧力計、ポートプラグ内での構造解析と機器の据付け検討、機器の耐放射線性試験など幅広い分野から多数の報告があった。どの計測装置についても構成機器のプロトタイプを製作してITERでの使用環境を模擬した設備で工学的な実証を行いながら、精力的かつ着実に課題を解決して進展している様子が明確に示された。また、ITER建設が順調に進展している様子も示された。ロシアでもプロトタイプを製作しながら各計測装置の設計を進展させている。特に、ダイバータトムソン散乱計測の光学系の透過率を較正するため、波長946 nmでパルスエネルギー1 J、パルス幅3 nsのYAGレーザーを独自に開発した成果が報告された。アメリカからは、マイクロ反射計について、2018年11月の予備設計レビューが終了した後にファーストプラズマまでに据付ける必要のあるポートプラグ内機器に注力して設計及び製作を進める一方、その他の構成機器に

については進展を保留する方針が示された。モーショナルシュタルク効果分光計測などのファーストプラズマまでに機器を設置しない計測装置については、これまでに引き続き本体の設計は保留され、一部のR&Dのみが進められていることが報告された。中国からは、ポートプラグ内の遮蔽モジュールの設計及びポートプラグ付近に設置された機器の保守手順などについてITER機構や他極と協調して進展させている様子が報告された。

谷塚（量研）から、日本が調達するITER計測装置の開発の進展について以下の報告があった。マイクロフィッシュチャンバーでは、信号伝送用無機絶縁ケーブルを過熱させないための銅メッキ技術を開発している。ポロイダル偏光計では、構成機器に関する様々な工学実証が進められている。周辺トムソン散乱計測装置では、ブランケットに埋め込んで設置するレーザービームダンプの開発に向け、高温モリブデン試料に対するレーザー繰返し照射試験を行い、損耗量とエネルギー密度の関係からレーザービームダンプの寿命を評価する実験を進めている。ダイバータ赤外サーモグラフィでは、ダイバータからの熱輻射について2つの波長で強度を比較することにより温度を測定するが、それぞれの波長を測定する光学系で取得するダイバータ像の位置ずれを1ピクセル以下で合わせることができ、温度勾配を持つダイバータを位置ずれした2つの光学系で測定したことによって生じる測定温度誤差は数%から10%程度と見積られる。

### 3. 周辺ペデスタル物理

第34回となる本会合には22名（欧州13名、米国4名、ITER機構1名、日本1名、中国2名、韓国1名）の参加者がおり、ITERの最重要課題であるELMの物理と制御、Hモードペデスタル構造の理解、LH遷移の発生条件、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。

ASDEX Upgrade及びDIII-Dから共鳴磁場摂動(RMP)によるELM抑制領域へのアクセス条件に関する報告があり、ペデスタルトップ位置でのExB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、ASDEX Upgrade、DIII-D、KSTARからは、プラズマ形状の高三角度化によりELM抑制領域が広がるという実験結果が示された。

本会合では、ITPA統合運転シナリオトピカルグループとの合同セッションが行われ、ITERでのシナリオ開発のために必要となる周辺ペデスタル予測に関する、ITPA統合運転シナリオトピカルグループからの要求項目に対して、ITPA周辺ペデスタル物理トピカルグループから進捗状況の報告が行われた。ITERのDT放電シナリオにおけるペデスタル構造予測、実効電荷数 $Z_{eff}$ の影響等について検討結果が報告された。予測に用いられたEPEDモデルは6装置からITER運転領域を含む15000ケースのデータベースで検証された。最近ではAlcator C-ModにおけるSuper Hモードのペデスタル構造もEPEDモデルと良い一致を示すという結果を得た。その他、ガス種による影響、燃焼フェーズの切り替え時におけるペ

デスタル構造に関する議論が行われた。また、水素同位体効果に関する国際装置間比較実験の提案があった。周辺ペデスタル部のMHD安定性に対する水素同位体の影響、inter-ELM フェーズにおける熱・粒子輸送に対する水素同位体の影響、ペデスタル密度分布に対する水素同位体の影響、水素同位体効果を考慮したペデスタル構造予測等の重要なトピックが提案され、ITERの非放射化フェーズ及び放射化フェーズに向けて、周辺ペデスタルの物理及び統合運転シナリオの両トピカルグループで横断的に検討すべきという議論が行われた。

ITER Physics Basis改訂に関する議論が行われた。ITPA 周辺ペデスタル物理トピカルグループとしては、ITER Physics Basisは全トピカルグループで編成されたドキュメントの中の1つの章として貢献することで合意し、目次と執筆者候補に関するドラフトを作成した。全体の調整及び執筆スケジュールに関しては、1月のITPA調整委員会でITER Physics Basisに関する今回の提案を行った後に、具体化していく方針となった。

#### 4. 統合運転シナリオ

今回は当グループの第21回目の会合で、ITER機構本部で開催された。日本1名、欧州16名（内、TV会議参加2名）、米国8名、韓国6名（内、TV会議参加2名）、ITER機構5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、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。そのために会合では、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、新たな共同課題の提案、運転シナリオのモデリングに関する発表と議論などを行った。「統合運転シナリオ」のグループ名が示す通り、課題は多岐にわたり、このグループのみで閉じるものではない。他のグループとの連携が重要という観点で、他のグループにも参加しているメンバーから、それぞれのグループの状況の報告も行った。特に、「周辺ペデスタル物理」トピカルグループとはジョイントセッションを行った。

ITER機構からは、ITER計画および組織の現状、特にファーストプラズマに向けた装置や運転シナリオの検討状況についての報告があった。先回の報告にも記載されたように、非放射化フェーズまでは、定格の1/3、および、半分のプラズマ電流/トロイダル磁場（それぞれ、5 MA / 1.8 T, 7.5 MA / 2.65 T）での運転が行われる。ITERでは、トロイダル電場として0.3 V/m程度の値が予測されており、この値はJETの0.5~1 V/mなどと比べて小さい。これらの条件でのプラズマ着火が懸案となっており、その解決の見通しを得るために、電離前、ECHやOhmicによる電離過程、磁気面の形成、プラズマ体積の増大過程などを記述するモデルの開発や、要素過程に関するコードベンチマークの進展の報告があった。モデル開発と併せて、その検証実験の必要性も指摘され、実験データの探索や新たな実験の検討を行うこと

とした。

現在、グループでは国際共同実験として以下の課題を実施している。グループの取り組みを俯瞰するためにも課題名を記載する。カッコ内は、課題番号である。(1.2) Divertor heat flux reduction in ITER baseline scenario, (1.3) Operation near  $P_{LH}$ , (1.4) ITER baseline scenario with dominant electron heating/low torque, (2.1) Compare helium H-modes in different devices, (3.1) Evaluation of steady-state scenarios with  $\min(q) \sim 1$  for meeting the ITER physics objective, (3.3) Fast ion and thermal energy transport with elevated  $q_{min}$ , (4.2)  $\rho^*$  dependence on transport and stability in hybrid scenarios, (4.3) Collisionality scaling of confinement in advanced inductive plasmas, and (5.1) ICRF impurity generation. これらの課題に関して、春の会合以降の進展や今後の展望に関する議論を行った。(4.2)と(4.3)については、これまでの取り組みで成果が挙がっていることや継続意志が確認できなかったため、終了の見込みとなった。

「周辺ペデスタル物理」トピカルグループとのジョイントセッションでは、2015年に本グループ側からリクエストした、「ELMを伴うDT運転シナリオ検討やイオン種ごとのペデスタル高さや幅に関する情報提供依頼」への回答という形で、EPED1データベースの拡充（定格、1/2, 1/3の磁場強度への対応完了）、EPED1-NN（ニューラルネットワーク版）の進展や、EPED1のHe対応が必要である現状などの報告があった。さらに、シナリオ検討の中で同位体効果を考慮する必要があるとの認識から、本グループと周辺ペデスタル物理、さらには輸送・閉じ込めグループとの共同の形態で、同位体効果の解明に取り組むことが提案され、それぞれのグループで担当者を指名し、計画の詳細化を進めることとなった。本グループでは、上記共同実験(2.1)の拡張課題として位置づける方針となった。

今回の会合では、プラズマ着火をフォーカスセッションとして重点的に議論したため、プラズマ制御手法に関しては時間をかけることができなかった。次回会合では、制御に重点を置くこと、制御はMHDとも深くかかわっているため、来年秋の会合での「MHD安定性」トピカルグループとのジョイントセッションを目指した議論を行う方針である。

最後に、これまでの検討結果をまとめるITER Physics Basisについて、章立てや担当者の確認を行った後、来年春は那珂、秋はガルヒンにて会合を開催することが提案され、了承された。

（原稿受付日：2018年12月20日）