

■ ITPA(国際トカマク物理活動)会合報告(63)

分野：「MHD 安定性」¹，「計測」²，「統合運転シナリオ」³

開催日：2017 年 10 月 9 日-11 日¹，2017 年 10 月 16 日-19 日²，2017 年 10 月 16 日-19 日³

場所：バルセロナ（スペイン）¹，ITER 機構（仏）²，フラスカーティ（イタリア）³

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，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，ピーターソン・バイロン(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，井手俊介(量研機構)³，林伸彦(量研機構)³，鈴木隆博(量研機構)³，長崎百伸(京大)³，花田和明(九大)³，藤田隆明(名大)³，横山雅之(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
MHD安定性	2018年3月5日-9日	那珂 (日本)
計測	2018年4月23日-26日	サンディエゴ (米国)
統合運転シナリオ	2018年4月9日-12日	デジョン (韓国)

1. 「MHD安定性」

第 30 回となる本会合には，日本 1 名，米国 16 名，欧州 17 名，中国 3 名，ロシア 3 名，韓国 2 名，ITER 機構 4 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，非軸対称垂直移動現象（Asymmetric Vertical Displacement Event, AVDE），粉碎ペレット入射（Shattered Pellet Injection, SPI），逃走電子（Runaway Electron, RE）に特化したセッションが設けられた。各セッションでは，それぞれ 1 日かけて，担当の座長がテーマの現状を説明した後に，個別の研究成果の発表があり，最後に参加者全員で議論を行った。

AVDEに関するセッションでは，Pustovitov 座長が，JET で観測された sideways force（AVDE に伴って真空容器に水平方向に働く巨大な力）が ITER で問題になりうることを指摘した。ITER における sideways force の見積もりに向けて世界各国で研究されている様々なモデルが紹介された。M3D を用いた ITER の AVDE シミュレーションによる sideways force の予測結果が紹介された。JET と ITER では電流クエンチ時定数と壁時定数の比が大きく異なるため，ITER では sideways force は JET の 2 ～ 5 倍程度で Noll 公式が予測する 20 倍よりかなり小さいことが報告された。実験に関しては，JET から ITER-like wall の下でのディスラプション実験結果が紹介され，sideways force が

VDE の非軸対称性の強さに依存することが示された。その後，sideways force の評価について，各モデルによって壁抵抗への依存性やスケールリング則との比較に対し異なる結果を出すため更に研究が必要であるとの議論があった。壁が 3 次元構造を持つときのキンクモードに伴う sideways force の評価や真空容器に流れるポロイダル電流のモデリングが重要であるとの議論があった。

SPI に関するセッションでは，Eidietis 座長が，ITER における SPI 研究課題のレビューをした。およそ 20 年間研究されてきた大量ガス入射（Massive Gas Injection, MGI）と比較して SPI は約 5 年間，DIII-D でのみ研究されてきたため，ディスラプション緩和に最適な粉碎前のペレット速度，粉碎後のペレットサイズ，不純物の割合，入射方向，非対称性などを研究する必要があることが紹介された。JET からは SPI 導入計画について紹介があり，システム自体は DIII-D と同様であり現在試験運転が始まっていることが紹介された。DIII-D から SPI を用いたときの RE 抑制実験について報告があり，MGI と同様に高 Z/低 Z (Ne/D₂) 入射により RE 散逸率が異なることが報告された。その後の議論では，粉碎後のペレットサイズの計測法やプラズマパラメータの影響，ITER に必要な SPI を設計するための実験プラン等について議論された。

RE に関するセッションでは，Lehnen 座長から研究課題の概要報告があった。現在のモデルで電流減衰率はおおよそ説明できるが，JET と J-TEXT で減衰率が飽和する機構などはまだ説明がつかないことが報告された。JET からは電流クエンチ中の 2 回目 MGI の際の減衰率は背景プラズマの状態や VDE の有無に強く関連するとの報告があった。その後，電流減衰率の飽和に関して，モデルの構築とそのための実験，Z の大きさと減衰率が異なるメカニズムの解明，および VDE の効果などを研究する必要があることが議論された。

回りの会合は 2018 年 3 月に量研機構那珂研で日米 MHD WS と合同で開催する予定であることが告知された。

2. 「計測」

第 33 回計測トピカルグループ（TG）会合には，約 60 名が参加した（内訳（含：遠隔参加）／日本：5 名，韓国：3 名，米国：4 名，EU：12 名，中国：2 名，ロシア：3 名，インド：2 名，ITER 機構：25 名）。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の寿命の最適化

スイスのチューリッヒ大学において，プラズマ対向第一ミラーの候補として考えられている単結晶のモリブデンミラー及びロジウムミラーの比較実験が，スパッタリングが発生する条件のヘリウムプラズマ環境下で実施された。その結果，モリブデンミラー，ロジウムミラーとも反射率におけるスパッタリングの影響は十分に小さく，単結晶ミラーが ITER における要求を満たせる見通しであることが確認された。また，プラズマ対向第一ミラーの長寿命化に重要なミラークリーニングに関する報告が数多く行われ

た。このうち、ロシアのヨッフェ研究所からは、アルゴンやキセノンなどの希ガスをういた高周波放電によるミラークリーニングの影響の評価の結果や、ベリリウムなどをミラーに堆積させた後のクリーニングを繰り返す行う実験の進捗などが報告された。

②壁反射光の光学計測への影響

スイスのバーゼル大学において、タングステン壁の表面粗さの違いによる、全反射や拡散反射等の壁反射光の影響の変化を調べるために、タングステン試料を用いた評価実験を行う計画が発表された。また、ITER ボロメータ計測において使用予定である白金箔の厚さの違いによる吸収放射パワーの評価が行われ、ITER で要求される95%の吸収率を得るためには、16 μm の厚さが必要であるとの結果が得られるなど、実機製作に向けた設計が進んでいる様子が報告された。

③損失アルファ粒子計測の検討

これまでの議論において、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 (μs 単位での計測) の観点から最適であると結論付けられたことから、本重要課題は本会合をもって完了することとなった。新たにFILDに特化した最重要課題を設定するかについては今後検討していくこととなった。

④プラズマ制御システムに関する計測要求

ITER機構においてプラズマ制御システム (PCS) のデータベースの整備が進められ、制御機能の設計、テスト及び実装のツールとして利用できるようになったことが報告されるとともに、PCS構築に向けた制御機能やシステム要求事項の精査を開始している状況が報告された。また、計測信号の実時間処理等、実時間制御システムの枠組みに関する詳細設計が進められ、2018年の初期には機能を制限した制御システムが完成する予定であることが示された。

⑤燃焼プラズマ環境に適応した計測校正手法の開発

本会合から新たに設定された最重要課題で、ITER中性子計測装置に対するその場校正試験手法の検討状況の報告があった。ITERでは数多くの (~ 30 個) 中性子検出器を真空容器内に設置することから、これらの検出器の校正試験の手法/戦略の検討が進められており、14 MeV中性子発生装置を用いた中性子発生源、遠隔装置を用いた中性子発生源の真空容器内輸送及び ITER 運転フェーズに応じた試験計画等、現在の検討状況の説明が行われた。

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の解決、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、マイクロ波パワー密度の分散計測、壁反射光モデルのベンチマーク試験、ITERの動的シュタルク分光 (MSE) 計測の設計推進のためのスペクトル計測による MSE 実験、真空窓におけるマイクロ波吸収の最小化。こ

のうち、「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」に関する共同実験においては、韓国の KSTAR 及び中国の EAST にて様々なプラズマ条件下でトロイダル回転とイオン温度の同時計測が行われ、両計測装置で得られた値は合理的に一致しているとの結果が報告された。また新たな共同実験として、逃走電子分布計測及び FILD に関する共同実験の提案が行われた。

2.3 各極の活動状況

会合初日に EU/ITER 機構のプログレス会合が開催され、EU の報告では、調達する計測装置のうち、TF コイルのケースに設置するロゴスキーコイルの実機の納入完了の報告の他、真空容器内コイルやボロメータ装置のプロトタイプ製作の進捗状況の報告に加え、様々な機器の照射試験の報告等があり、実機製作に向けて各計測装置の設計が大きく前進していることが確認できた。また、ITER 機構からは、ITER機構が調達する各計測装置の設計の進捗の他、水平ポートの遮蔽設計やポートプラグ構造の認証に向けて溶接作業の検証を開始している様子等の状況が報告された。その他、米国からは ITER 用トロイダル干渉計/偏光計のプロトタイプが DIII-D に設置された後にプラズマ実験に適用され、低ノイズレベルを維持しながら計算結果とよく一致した計測が行われ、ITERでの適用に見通しがつく等の進捗が報告された。ロシアからは、原子炉を利用したダイバータ中性子束モニタの試験結果に加え、H-alpha 計測に使用するファイバーバンドルのプロトタイプ製作やファイバーの放射線照射試験の準備状況など、実機を想定した試作試験が進められている様子が報告された。

2.4 日本からの報告

秋山氏 (核融合研) からは、ITER の密度干渉計/偏光計測の詳細設計の進展が報告され、LHD で得られた成果から、ITER のファーストプラズマフェーズにおける計測において、ITER の計測ターゲットを達成できる見通しであることが示された。西谷氏 (核融合研) からは、LHD に設置した中性子計測装置の校正試験及び 2017 年 3 月より実験を開始した重水素プラズマにおける中性子計測の初期結果の報告があった。谷塚氏 (量研機構) から、ITER 周辺トムソン散乱計測による電子温度計測のその場校正手法の進捗が報告され高い評価を受けた。今澤氏 (量研機構) からは、Wendelstein 7-X で行われている実時間制御試験の初期結果など実時間専門家ワーキンググループの活動状況が報告された (今澤氏は同ワーキンググループの議長) 他、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. 「統合運転シナリオ」

今回は当グループの第19回目の会合で、ENEAで開催された。日本2名、欧州9名、米国5名、韓国3名、中国1名、ITER機構3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2016年に開催された第26回IAEA核融合エネルギーコンファレンスで発表されたグループ共同論文のフォローアップおよび次回の核融合コンファレンスでの発表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、物理課題やITER研究計画についての報告があった。また、加熱電流駆動装置の準備の現状や、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。

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) での運転を想定している。最近では、初期の運転時期に定格の 1/3 の運転 (5 MA / 1.8 T) を行う可能性も議論されている。これらの弱磁場実験で懸念されているのが、ECを用いたプラズマ着火の確実性で、着火に関する議論に時間が割かれた。170 GHz のジャイロトロンでは 1.8 T では第三高調波の共鳴になるので第三高調波での着火、またより低い周波数のジャイロトロンを用いた場合等について議論された。また、着火時にヌル点を作る通常の磁場配位ではなく、最初から垂直磁場をかける配位 (TPC: Trapped Particle Configuration) について、実験を行っている KSTAR (韓) から良好な結果 (第三高調波までは行って

いない) について報告があった。第三高調波の着火については今後も、実験及び理論での検討が必要である。

国際比較実験に関連しては、いつものように DIII-D (米), KSTAR (韓), ASDEX-U (独), JET (欧) 等各国のトロイダル実験装置の現状や運転計画の報告が行われた。KSTAR では、ITER 標準シナリオ (15 MA, H モード) と同等の放電が得られ、また別途 70 秒の H モード放電も得られた。

プラズマ制御手法に関しては、モデリングやシミュレーションでの進展が続いているが、実験においても、モデル予測を用いた ASDEX-U (独) における電子温度分布制御や、DIII-D における小トルク入力での中心安全係数や規格化ベータ値の実時間制御等の報告があった。今後とも大きく発展する領域である。

現在運転中のトカマク装置だけでなく、建設中の JT-60SA (日) の現状、ダイバータ研究に主眼を置く DTT (伊) の設計等について報告があった。また、LHD (日) における重水素運転や Wendelstein 7-X (独) の初期運転の結果等、ヘリカル装置からの報告も行われた。

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こととなった。

(原稿受付日：2018 年 1 月 9 日)