

■ ITPA(国際トカマク物理活動)会合報告(80)

分野：「計測」¹，「高エネルギー粒子物理」²，
「統合運転シナリオ」³

開催日：2021年10月25日～28日¹，
2021年11月2日～5日²，
2021年11月15日～19日³

場所：ITER 機構での現地開催とリモート会議のハイブリッド形式¹，リモート会議^{2, 3}

担当委員：

秋山毅志(GA)¹，石川正男(量研)¹，磯部光孝(核融合研)¹，ピーターソン・バイロン(核融合研)¹，江尻晶(東大)¹，谷塚英一(量研)¹，佐野竜一(量研)¹，Andreas Bierwage(量研)²，隅田脩平(量研)²，藤堂泰(核融合研)²，長壁正樹(核融合研)²，永岡賢一(核融合研)²，篠原孝司(東大)²，村上正義(京大)²，打田正樹(京大)³，林伸彦(量研)³，鈴木隆博(量研)³，長崎百伸(京大)³，藤田隆明(名大)³，横山雅之(核融合研)³，若月琢馬(量研)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
高エネルギー粒子物理	2022年3月10日～12日	ITER機構(フランス)
統合運転シナリオ	2022年5月9日～13日(暫定)	Lehigh大学(米国)
計測	2022年5月ころ	*ITER機構(フランス)

*当初日本開催だったが COVID-19 拡大の影響により ITER 機構開催で調整中

1. 「計測」

第40回計測トピカルグループ(TG)会合が，ITER 機構での現地開催とリモート会議を組み合わせたハイブリッド形式で開催された。本会合には，世界各国から現地参加者約40名を含めて，全体で約80名が参加した。会合の初日には建設が進む ITER サイトへの見学も実施された。会議の主な内容を以下に記す。

1.1 ITER の計測における最重要課題への取り組み状況

本会合では，計測トピカルグループの6つの最重要課題のうち，「プラズマ対向第一ミラーの寿命の最適化」に関する報告が数多く行われた。オランダのTNO研究所では，日本が調達を行う周辺トムソン散乱計測システムのプラズマ対向第一壁ミラーのクリーニングのテストを進めており，実機を模擬したミラーユニットとこれを設置する計測シールドモジュールのモックアップに対して，ミラークリーニングに適したインピーダンスの評価などが進められている。また，スイスのバーゼル大学では，強磁場によるプラズマ対向第一ミラーの影響が評価されており，3Tの磁場強度の中では表面材質の侵食とその再堆積が無視できないことが示唆される結果が報告された。また，韓国の上部ポート及び水平ポートに設置する

真空紫外線分光計測システムでは，プラズマ対向第一ミラーに使用を予定している各材料の熱サイクル試験及び蒸気封入試験を行なった結果，シリコンミラーが最も有望であるとの結果が報告されている。他の最重要課題に対しては，「プラズマ制御システム」とともに，今回の会合から新たに加えられた「トモグラフィー手法の開発」及び「平衡再構成手法の最適化及び検証」に関する議論も進められた。

1.2 ITPA/IEA 共同実験に関する議論

以下に示す共同実験の実施状況について議論した。

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は計画的に他国間の研究チームが共同で進めており，アメリカのDIII-Dではガンマ線のイメージング計測を行うための硬X線検出器の開発や試験の進捗報告が行われた他，イギリスのJET，ドイツのASDEX-Upgrade，中国のEAST及びチェコのCOMPASの各装置からも共同実験に向けた作業の進捗が報告された。

1.3 各極の活動状況

会合初日には開催国である欧州及びITER機構が担当するITER計測装置の進捗報告が行われた。現在，多くの計測装置が製作段階に入っており，ファーストプラズマ時に重要な役割を果たす磁気センサーについては，真空容器の外壁に設置される磁気センサー及びトロイダルループの真空容器セクター6番への設置が完了したことに加え，真空容器内壁に設置する磁気コイルの製作が工場受け入れ検査を経て完了したのち，ITER機構に輸送され，現地受入試験でも合格した様子が報告された。また，その他の真空容器に設置される機器についても，設置公差を考慮した設置手法の最適化やレーザーマーカーを用いた溶接位置の特定方法の検討といったように，製作だけでなく，設置に向けた検討が大きく前進している様子が伺えた。さらに，真空窓やECHセンサーに加え，ポートプラグ試験施設などの設計も進んでおり，多くの計測装置の設計が加速化していることが確認できた。韓国からは，ITERの中性子総発生量を計測する放射化箔システムのうち，放射化箔の移送ラインの製作が進んでいる様子が報告された。中国からは，水平方向中性子カメラにおいて，真空容器内で検出した信号をポートセルで増幅するための前置増幅器(プリアンプ)を始めとする電子機器の設計が進捗した他，ラングミュアプローブの開発において，検出器部のプロトタイプに対して行った高熱負荷試験に合格し，製作に向けて設計が大きく前進した様子が報告された。アメリカからは，始めに計測装置の設計及び製作活動の加速化に向けて，国内研究機関の協力体制が再構築されたことが報告され，新たな枠組みで進められたダイバータトムソン散乱計測や低磁場側反射計の設計の進捗が報告された。ロシアからは，H α 及び可視分光計測システムのうち，ポートプラグに設置する機器や中性粒子計測装置の構成部品の製作や加工が進み，調達活動が大きく前進している様子が伺えた。イン

ドからは、調達を担当する X 線結晶分光、電子サイクロトロン放射計測および荷電交換分光計測の設計最適化に向けて、熱解析や核解析及び光線追跡 (Ray-tracing) 等が積極的に進められている様子が報告された。

1.4 日本からの報告

石川氏 (量研機構) からは、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ェンバーでは、信号処理システムの設計の進捗に加え、ITER 環境に最適化したプリアンプやアンプユニットのプロトタイプ製作に関する報告が行われた。ポロイダル偏光計では、真空容器内に設置するレトロリフレクタの製作計画及び水平ポートに設置する光学機器の設計の進捗が報告された。周辺トムソン散乱計測装置では、高エネルギーの YAG レーザーを真空容器内で終端するビームダンプの最新の設計が報告された。ダイバータ赤外サーモグラフィでは、真空窓に使用予定の反射防止膜付きサファイア材を用いた放射線照射試験の結果が示され、ITER で適用可能であるとの見通しが立った。ダイバータ不純物モニターでは、プラズマに対向する第一ミラーに設置するシャッターやミラークリーニング機構の設計の進捗が報告された。

2. 「高エネルギー粒子物理」

第26回となる本会合は2021年11月2～5日にオンラインで開催された。常時参加者は55～65名程度であり、26件の発表があった。最初に ITER の進捗状況が報告され、そして合同実験と個別の実験・解析結果についての報告があった。最後に Nuclear Fusion (NF) 誌特別号への投稿に関して議論が行われた。

ITER 機構の S. Pinches 氏より、ITER 組立の進捗状況の紹介と高エネルギー粒子物理に関わる課題の確認が行われた。今回の会合から新規の合同実験が3件追加された (EP14-16)。合同実験に関する報告は下記の通りである。EP6 は周辺局在化モード (ELM) や共鳴磁場摂動 (RMP) 等の周辺磁場摂動による高速イオン損失の検証を行う合同実験である。ここでは、W-7X での高速イオン損失検出器 (FILD) に用いるファラデーカップの改良方法に関する紹介があった。また KSTAR における RMP 時の FILD 信号を NuBDcode で定性的に再現したという報告があった。イオンサイクロトロン放射 (ICE) の高速イオン診断への適性を評価する EP9 では、MAST-U、DIII-D、NSTX-U での新たな観測結果が報告された。加えて、EPOCH コードを用いた数値計算との周波数スペクトルの比較により、LHD で観測された ICE の駆動源が DD 核融合生成プロトンであることが確認された。これにより、LHD はステラレータとして初めて核融合生成物に起因した ICE を観測したことになると説明があった。高 q (安全係数) での定常放電における高速・熱化イオン輸送の解明を目指す EP10 では、準線形コード RBQ を用いたトロイダルアルヴェン固有モード (TAE) による輸送の解析結果が紹介された。高速イオンの位相空間トモグラフィを試みる EP11 では、トモグラフィに

必要な位相空間における計測感度の重み分布を JET の中性子計測とガンマ線計測で評価した結果が紹介された。また関連して W-7X では、位相空間における高速イオンの減速分布関数を基底に置いてニューラルネットワークを用いることにより、高速イオン荷電交換分光 (FIDA) 計測信号から位相空間分布関数への逆変換を試みる新たな手法について紹介があった。ITER でのアルヴェン固有モード (AE) の制御法の確立を目指した EP12 では、最近の KSTAR におけるプラズマ電流の順方向と逆方向の電子サイクロトロン電流駆動 (ECCD) を組み合わせた実験が紹介された。しかし、この手法ではまだ現時点で AE の抑制は観測されていないと説明があった。ITER に向けた先進的な ICRF 加熱法の確立を行う EP13 では、最近の JET と ASDEX-U における3種イオン加熱実験結果について紹介された。JET の DT プラズマでは、3種イオン ICRF 加熱は NBI に匹敵する加熱効率を有するという3種イオン加熱法の有効性を示す結果が報告された。NBI や ICRF 加熱、アルファ加熱時の高速イオン分布関数モデルを検証する EP14 では、IMAS (Integrated Modeling and Analysis Suite) の加熱・電流駆動モジュールが紹介された。そして ITER や JET、ASDEX-U において、主な検証研究は既に過去に実施されたため、現在は進んでいないとの説明があった。非線形領域での高速イオン駆動不安定性モデルの検証を行う EP15 では、ITER と DIII-D におけるフィッシュボーン不安定性や AE、捕捉電子モード (TEM) に対して様々なコード (GTC, M3D-C1, ORB5, GYRO, NOVA) による評価結果が紹介された。高速イオン等の位相空間分布関数の座標変換方法の確立を目指す EP16 では、粒子軌道上の代表点を用いて分布関数を評価する手法が紹介された。この手法では、元の6次元分布関数に変換可能な形式で保存量に特異点や不連続性がないように分布関数を評価できる等の様々なメリットがあると説明があった。

個別の報告では、熱イオンの運動論的效果を扱えるように MEGA コードが改良されたことが紹介された。この MEGA コードによりスーパーコンピュータ富岳を用いて ITER 定常運転シナリオでの AE を計算した結果、運動論的熱イオンを考慮すると AE の成長率と飽和レベルが低下し、それに伴う高速イオン輸送も低減したと説明があった。他にも、EAST における測地的音波モード (GAM) と高速電子が駆動する TAE の非線形結合の観測結果や、KSTAR での RMP 時に高速イオン閉じ込めの改善を示唆する観測結果などが報告された。

今回は、3月10～12日にフランスの ITER 機構にて開催される。

3. 「統合運転シナリオ」

第27回となる本会合は2021年11月15～19日にオンラインで開催された。参加者数はセッションごとに開きがかったものの、25～40名程度であった。統合運転シナリオトピカルグループ (IOS TG) は、ITER の運転シナリオに関する課題について議論し、参加者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共同実験 (Joint Experiment (JE)) や解析・モデリング共同活動 (Joint Activity (JA)) の進捗の報告と議論、新たな共同取り組み課題の提案、運転シナリオ制御に関する発表と議論などが行われた。また今回は、運転制御に焦点を絞ったセッションが設けられた。

ITER 機構より、サイト建設や IOS TG に関連するシステム設計の進展、及び、特筆すべき研究開発項目などの報告があった。続いて、IOS TG に関連した各極装置での実験に関する報告がなされた。英国 JET 装置は会合期間中に DT 実験を実施していたが、その結果についてはさらなる解析が必要ということで、詳細は語られなかった。また、JET の英国原子力公社 (UKAEA) 資産化に伴う体制再編に関しても紹介があった。米国 DIII-D 装置からは、NBI, ECH の整備、ショット間でのトロイダル磁場反転などの実験環境向上に関する内容とともに、2022 ~ 23 年におけるマシンタイム配分が重点化 (ITER Preparation など 4 タスクフォースと 5 つの特筆課題 (Thrusts)) された状況で検討されていることが報告された。その他、ディスラプション回避のための高速シャットダウン時に、ランプダウン中にリミタ配位に移行するとディスラプション率が低くなり、ランプダウン率 $I_p/dt = 2 \sim 3 \text{ MA/s}$ で最もディスラプションが低く 10% 程度となることが報告された。また、熱クエンチ後にヘリカルコアを持ったプラズマを生成して 100 ms 程度まで電流クエンチを延ばす方法が紹介された。英国 MAST-U は、第一期物理キャンペーン (2021 年第三四半期まで) で、NBI 加熱パワー 3 MW 超での ELMy H モードの達成、ロバスタなプラズマ立ち上げシナリオの獲得などが達成された。韓国 KSTAR からは、イオン温度 9 keV 超の 30 秒以上の維持、Kr 導入による ITB 形成、10 秒を超える $\beta_N > 3$ の維持などの成果が報告された。

各 JE 及び 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。共同実験 IOS-1.3 “Operation near P_{LH} ” について、独国 ASDEX Upgrade において正味加熱パワーが LH 遷移閾パワーに近いほど H ファクターが上昇する結果が得られていることなどが報告された。同 IOS-1.4 “ITER baseline with dominant electron heating/low torque” について、ITER の標準運転シナリオ相当のプラズマにおける、不純物 (Kr, Xe, W) 入射 (DIII-D) および IC 加熱と NB 加熱の比較 (JET) などが報告された。同 IOS-2.3 “Integrated H-mode termination scenarios” に関連して、W 壁の JET のハイブリッド運転の放電終了において加熱終了後も W がコア部に残ることが問題であり炭素壁の場合よりも困難となったことが報告された。共同活動 IOS-JA15 “Development of fast discharges at plasma initiation” では、様々な装置の実験データがまとめられた。放電初期の逃走電子の抑制に ECH によるプラズマ抵抗の低下が有効であることなどの結果が得られているが、有意な量の逃走電子の検出基準が装置ごとに異なっており ITER での発生の予測のためには統一した基準の確立が必要であることが強調された。

運転シナリオ制御に関する focus session では冒頭に、今後 IOS がどのような活動 (JE や、他 TG との連携) を行うことで、運転シナリオ制御の研究に貢献することができるかを議論したい、との方向性が示された。ITER の R&D issues の中から運転シナリオ制御に関する部分を抜き出すと、disruption free 運転の研究に対する要求度のみ緊急度が高く設定されているが、実際に disruption free 運転を実現するためには、燃焼制御、ELM 制御、不純物制御、分布制御等、その他の個別の制御が実現している必要があるため、結局全体として進めていく必要があるとの指摘があった。続いて、ITER PCS の開発に貢献するために必要なことという視点で、ITER PCS の開発思想やアーキテクチャ、開発スケジュール等が概説された。最後に、MHD 安定性 TG と連携して実施している disruption free 運転の進展状況及び今後の展開について米国 D. Humphreys 氏より発表があった。DIII-D では disruption の運転限界への近さ (proximity) を評価し、そこから離れる制御が行われているが、そのシステムの一部を中国 EAST 装置、韓国 KSTAR 装置に導入した結果が報告された。この例にあるように ITER の PCS の開発に貢献するためにはいくつかの装置でその機能をテストする方が望ましいため、どのような枠組みで制御システム他装置への導入を行うことができるのかを議論する必要がある、という点が指摘された。

最終日には Advanced scenario に関して、AUG と DIII-D の高ベータプラズマの実験結果のレビューが報告された。AUG では、W 壁で高ベータプラズマが得られており、その性能は C 壁で得られたものより高く、加熱増加で閉じ込め性能の劣化は見られないこと、燃料供給と加熱の少しの違いで結果が大きく異なることが報告された。プラズマの性能は、MHD モードと不純物蓄積の両方あるいはどちらかで制限されており、強いイオン温度勾配で W の炉心への侵入が遮蔽される解析結果もあることが示された。DIII-D からは、EAST との共同実験で得られた内部輸送障壁 (ITB) のある高ベータ非誘導電流駆動プラズマの実験結果が、その結果を得るに至った、JT-60U 実験を多く含めたそれまでの研究と合わせて報告された。圧力勾配と密度勾配が強い場合に乱流の不安定モードの種類を変えて乱流輸送を低減し閉じ込め性能を高めること、境界輸送障壁が弱くなれば ITB が強くなり全体の閉じ込め性能が高まること、ELM によってその状態が誘引されることが示された。

(原稿受付日：2022 年 2 月 10 日)