

■ ITPA(国際トカマク物理活動)会合報告(66)

分野: 「計測」¹, 「高エネルギー粒子物理」²

開催日: 2018年4月23日ー4月26日¹,

2018年5月23日ー5月25日²

場所: ゼネラルアトミクス社(米国)¹,

ITER機構(フランス)²

担当委員:

秋山毅志(核融合研)¹, 石川正男(量研機構)¹, 磯部光孝(核融合研)¹, ピーターソン・パイロン(核融合研)¹, 伊丹 潔(量研機構)¹, 江尻 晶(東大)¹, 河野康則(量研機構)¹, 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(量研機構)², Andreas Bierwage(量研機構)², 村上定義(京大)², 山本 聡(京大)²

(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
計測	2018年10月8ー11日	ITER機構 (フランス)
高エネルギー 粒子物理	2018年9月3ー5日	リスボン (ポルトガル)

1. 「計測」

第34回計測トピカルグループ(TG)会合が米国のゼネラルアトミクス社にて開催された. 本会合には, 約50名が参加した(内訳(含遠隔参加)/日本5名, 韓国3名, 米国18名, EU9名, 中国7名, インド4名, オーストラリア1名, ITER機構4名). 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

① プラズマ対向第一ミラーの寿命の最適化

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懸念されており, 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. ロシアのヨッフェ研究所において, 第一ミラーを電極として容量結合プラズマを生成し, 堆積した金属微粒子を除去する方式に関して進展があった. 容量結合プラズマ中における金属微粒子の輸送及び再堆積を考慮したモンテカルロシミュレーションコードが開発され, ミラー表面上の膜厚分布測定とシミュレーションの良好一致が報告された. また, ロシアのクルチャトフ研究所において, 真空容器内での漏水を想定し, 表面を水蒸気によって腐食させたモリブデンミラーをクリーニングする実験が行われ, その結果, 可視域では元の反射率の80~90%まで回復したことが報告された.

② プラズマ制御システムに関する計測要求

韓国国立核融合研究所のKSTARにおいて, ITERの制御・データ通信システム(CODAC)と同様にネットワークを組み, ガスパフ及び超音速分子ビーム入射をアクチュエータとし, ミリ波, 遠赤外及び2波長干渉計による測

定を用いて電子密度をリアルタイム制御することで, 55秒間Hモード放電を維持したことが報告された. また, 中国科学院プラズマ物理研究所からは, EASTにおけるプラズマ制御システムの拡張計画が示された.

③ 燃焼プラズマ環境に適応した計測校正手法の開発

本会合では, レーザー利用計測ワーキンググループから, ITERで計画しているトムソン散乱計測の校正手法に関する概要が示された.

1.2 ITPA/IEA 共同実験に関する議論

以下に示す9件の共同実験の実施状況について議論を行った: ①第一ミラーの環境試験, ②放射化プローブの環境試験, ③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, ④マイクロ波パワー密度の分散計測, ⑤壁反射光モデルのベンチマーク試験, ⑥ITER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, ⑦真空窓におけるマイクロ波吸収の最小化, ⑧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, ⑨ITERでのシンチレータを使用した高速イオン損失検出器(FILD)の開発に向けた重要な機器試験, 校正及びシミュレーション. このうち, 「⑧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」に関する共同実験においては, $\text{Lu}_{1.8}\text{Y}_{0.2}\text{SiO}_5:\text{Ce}$ (LYSO)シンチレータと多ピクセル光電子増倍管の組合せにより, 10 MeV程度までのエネルギー分布を10 MHzの繰返し率で測定できるようになったことが報告された. また, この検出系をDIII-Dのディスラプション時の測定に利用したところ, 予期していたよりも検出率が高く, 10 MHzで測定しても信号がパイルアップしたことが併せて報告された. 今後の改良を通じて, ガンマ線分光による逃走電子の研究の進展が期待される.

1.3 各極の活動状況

会合初日に米国のプロGRESS会合が開催され, ITER初プラズマに使用されるマイクロ波反射計に関して, ITER運転期間中の温度変化で生じた伝送管の変位に合わせてミラーを受動的に動かし, マイクロ波の光軸ずれを抑制する機構をプロトタイプにより実証したことが報告された. また, 電子サイクロトロン放射(ECE)計測用で利用する100~1000 GHzのマイクロ波のエネルギー損失が低い導波管をインドと共同で開発に成功したことも報告された. ITER機構からは, ITER機構が調達する各計測装置のうち, 主に中性子計測の校正手法に関する検討の進捗と, 磁気計測に関するR&Dの進展について報告された. EUからは, 主に, Wendelstein 7-Xにおけるナトリウムビームを用いたビーム放射分光計測による磁気島付近の乱流計測, ASDEX-Uにおけるダイバータトムソン散乱計測に関する光学系の大幅な改良, FILD計測の空間チャネル増強, JT-60SAへのイベント検出インテリジェントカメラ(EDICAM)設置計画について報告された. さらにオーストラリアから, ITERダイバータ領域のイオン流速測定のためのコヒーレンスイメージング偏光/干渉計に関する検討の進展が報告された.

1.4 日本からの報告

秋山氏（核融合研）からは、ITERのディスラプション緩和システム稼働時における極端に高い電子密度（ $\sim 10^{22} \text{ m}^{-3}$ ）を測定するための波長 $1 \mu\text{m}$ の干渉計／偏光計の測定精度に関しベンチトップ実験による初期評価を行った結果、良好な測定精度が期待されることが報告された。また、LHDにおけるイオンサイクロトロン放射（ICE）について、実験結果が非線形シミュレーションによって良く再現されていることも報告された。西谷氏（核融合研）から、LHD及びJT-60Uにおける経験に基づき、中性子計測装置の較正手法について提言がなされた。また、核融合研と大阪大学が共同で進めている 14 MeV 中性子検出器の開発及び試験について報告された。ピーターソン氏（核融合研）からは、ITERの放射強度分布測定のためのイメージングボロメータについて、放射を吸収する白金薄膜の厚さと信号ノイズ比の関係についての評価が報告された。西浦氏（東京大学）からは、硬 X 線計測器用の試験設備の検討及び ITER 中性子イメージング計測のための液体シンチレータアレイの適用性評価という2つのアクションが完了したなど、照射効果専門家ワーキンググループの活動状況が報告された（西浦氏は、同ワーキンググループの副議長）。谷塚氏（量研機構）からは、ITERの第一壁をグロー放電洗浄する際に周辺トムソン散乱計測用のミラーに粒子が飛来することを防止するシャッターの開発について報告された。真空中での摺動に起因する故障を避けるために、フレキシブルピボットによる回転機構を設け、実規模で製作したプロトタイプシャッターが1万回の開閉に耐えることが示された。また、日本が調達する ITER 計測装置の開発状況、JT-60SAの総放射強度測定用マルチアパーチャボロメータの設計、LHDにおけるシンチレータを利用した軟 X 線計測について進展が報告された。

2. 「高エネルギー粒子物理」

第 19 回となる本会合は、フランスの ITER 機構にて開催された。参加者はリモート参加も含め約 35 名、34 件の発表があった。ITER 機構で実施する意義は、ITER 機構の計測装置担当者にも参加してもらい、計測装置の最新の状況を「高エネルギー粒子物理」グループのメンバーが理解したり、計測装置担当者が設計指針に対する助言を得たりすること及び「高エネルギー粒子物理」グループのメンバーが ITER の建設現場を見ることで ITER 貢献への意識を新たにすることであるが、いずれの目的も達成されていた。特に ITER 建設現場の見学では製作中のクライオスタットの中性粒子ビーム（NB）ポートを前に参加者は ITER での高エネルギー粒子物理研究が確実に近づいていると感じていた。

会合では、はじめに、ITER の進捗状況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。

計測装置開発の進捗状況の報告では、ITER のプラズマに閉じ込められている高速イオンを計測する協同トムソン計測（CTS）、高速中性粒子計測（NPA）、中性子・ γ 線カメラ、損失高速イオン診断としての γ 線計測、損失

高速イオンプローブ（FILD）の現在の状況が報告された。課題を克服しながら、設計と開発が進んでいた。加えて、DIII-D より高速中性粒子の空間とエネルギーの2次元情報を高精度で計測できる新しいアイデアに基づくイメージング NPA が報告された。一方、ITER において高速イオンを生み出す NB 及び ICRF 装置がついた最初の運転時に NPA と γ 線計測しかないことが問題視された。

共同実験では、ELM（周辺部に局在した不安定性）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共同実験 EP6 においては、RMP の影響について ASDEX-U（AUG）と MAST の解析結果、DIII-D と KSTAR から新しい実験結果の報告があった。KSTAR の結果では ELM 抑制時の損失イオン量のモジュレーションが報告された。不安定性を考慮した NB 電流駆動の検証を扱う EP8 では、NSTX、DIII-D、AUG でのモデル検証の進捗が報告された。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、JET の既存のデータに対する最新の Particle-in-Cell 手法による解析報告と DIII-D の NB 打ち分けによる ICE 信号の変化に関する新しい実験データの報告があった。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、MAST の計測装置を事例として条件付き再構築計算が重要であることが示された。また、FILD などの“ぼやけ”を解消できることも示された。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、DIII-D で高 q_{min} 放電をターゲットとした AE 抑制領域のパラメータスキャンの実験結果、KSTAR での ECH による抑制に関する解析の報告があった。

JET の DT 実験の計画についての報告もあった。ITER 貢献を念頭に ITER を模擬したシナリオ作りを進めているとのことであった。また、TAE 実験用のシナリオ作りも進んでいる旨報告があった。

数値計算コードの進展については、バルクイオンの運動論効果を入れた MEGA コードによる TAE の飽和と高速イオン駆動測地線音波振動 モード（EGAM）に関する解析の報告があった。EGAM によるエネルギーチャンネルリングについても報告された。米国内で行われているより現実的な条件（DIII-D の実験データ）でのベンチマークケースも紹介された。この中には MEGA コードなど米国外のコードもいくつか含まれており、周波数など実験結果とよい一致を示し、良いベンチマークケースとなっている。また、ティアリングモードの安定性への捕捉高速イオンの影響が実験で観測されているが、理論モデル及び M3D-K コードによる解析の報告や、ペレットによる密度のポロイダル不均一性が TAE ギャップを広げるとの報告もあった。

加えて、ITER Physics Basis（Nuclear Fusion 誌）の改訂の具体的な進め方をテーマ毎に議論した。

（原稿受付日：2018 年 6 月 11 日）