



インフォメーション

■ITPA (国際トカマク物理活動) 会合報告(49)

- 分野: 「高エネルギー粒子物理」¹, 「MHD 安定性」², 「統合運転シナリオ」³, 「輸送と閉じ込め物理」⁴
- 開催日: 2015年3月25日 - 3月27日¹, 2015年4月14日 - 17日², 2015年4月20日 - 23日³, 2015年5月5日 - 7日⁴
- 場所: サン・ポール・レ・デュランス(フランス)^{1,2,4}, バルセロナ(スペイン)³

担当委員:

篠原孝司(原子力機構)¹, 東井和夫(核融合研)¹, 藤堂泰(核融合研)¹, 長壁正樹(核融合研)¹, Andreas Bierwage(原子力機構)¹, 村上定義(京大)¹, 山本聡(京大)¹, 諫山明彦(原子力機構)², 榊原悟(核融合研)², 古川勝(鳥取大)², 政宗貞男(京都工繊大)², 松永剛(原子力機構)², 山崎耕造(名大)², 渡邊清政(核融合研)², 井手俊介(原子力機構)³, 林伸彦(原子力機構)³, 鈴木隆博(原子力機構)³, 花田和明(九大)³, 福山淳(京大)³, 長崎百伸(京大)³, 藤田隆明(名大)³, 本多充(原子力機構)^{4*}, 吉田麻衣子(原子力機構)^{4*}, 坂本宜照(原子力機構)⁴, 宮戸直亮(原子力機構)⁴, 田中謙治(核融合研)⁴, 田村直樹(核融合研)⁴, 井戸毅(核融合研)⁴ (下線は当該グループの会合への出席者を, 1から4の上付き数字はグループとの対応を示す。また, *は遠隔参加を示す)

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
高エネルギー粒子物理	2015年9月7日 - 9日	ウィーン(オーストリア)
統合運転シナリオ	2015年10月12日 - 15日	合肥(中国)
MHD 安定性	2015年10月19日 - 21日	ナポリ(イタリア)
輸送と閉じ込め物理	2015年10月22日 - 23日	ガルヒン(ドイツ)

1. 「高エネルギー粒子物理」

本会合は第14回となり, 参加者は約35名, 40件の発表があった。

はじめに, 高エネルギー粒子物理に関わる課題, 及び, 前回の会議でのアクションアイテムの確認が行われた。

現在活動中の共同実験は, 2つである。ELM 制御コイル磁場擾乱中の高速イオン閉じ込め及び ELM と高速イオンの相互作用を扱う EP6 では, DIII-D, JET, KSTAR から報告があった。DIII-D では短時間の ELM コイル磁場擾乱の入り切りで高速イオンとバックグラウンドの応答を切り分けた実験を行い, さらに実験条件を反映した数値解析を行った。結果, ELM コイル磁場擾乱そのものがプラズマ周辺部の高速イオン密度劣化を招いていることを示した。JET は, エラー磁場補正コイルによるトロイダルモード数

$n = 1$ 磁場擾乱が核融合生成高速プロトンの軌道に影響を及ぼしているということを高速イオン損失プローブ(FILD)のデータから示した。加えて, ELM によって 105 keV の NB イオンが損失していることを示した。KSTAR からは FILD の応答がコイル結線パターンに対応していることと FILD で計測される高速イオンのピッチ角の広がり真空磁場を用いた計算と矛盾していないことが報告された。ECH/ECCD によるアルヴェン固有モード(AE)の制御に関する EP7 では, DIII-D における ELM を完全に抑制したハイブリッド定常放電での実験結果が発表された。この放電のプラズマ中心部に ECCD を行うと TAE/EAE が抑制され, さらに, 高速イオンの閉じ込めが改善していることが報告された。加えて, 前回終了した 2 件の共同実験である AE の非線形時間発展を扱う EP4 と DIII-D の Test blanket module (TBM) モックアップ磁場環境下の高速イオン閉じ込め評価を行う EP5 については, これまでのまとめと今後の予定が示された。

AE コードのベンチマーク活動については, ITER の AE におけるトロイダルモード数依存性の比較が報告された。減衰機構の取り扱いにより幾らかの違いはあるが, $n \sim 30$ が最も不安定であることなど, 概ね同じ傾向を示した。加えて, 各コードの最近の成果が報告された。MEGA コードは, 計算の負荷が高くなる AE と高速イオンの相互作用を時間的に入り切りする手法で DIII-D 実験結果をうまく再現し, その有効性を示すとともに AE 発生時の高速イオン分布に関する知見を示した。

また, AE 安定性解析では高速イオン分布の位相空間での微分が重要である。そのため安定性解析ができるように NBI と ICRF が作り出す高速イオン分布を計算する活動を開始したが, それぞれの準備状況が報告された。EU は, 該当コードのベンチマークを EUROfusion のタスクフォースで実施しており, 今後の活動に迅速に対応できるという印象を得た。新たなモデリング活動として確率的輸送モデルの評価に関するものと不安定性があるときの NB 電流駆動に関するものが提案された。

高速イオン研究に絡む計測器の現状と課題について, ITER 機構の計測器担当者による報告があった。本トピカルグループから, 詳細設計に向けた協力として, 特定の壁への熱負荷の情報や高速イオンの速度分布形状を提供することとなった。

今回, 開催場所が ITER 機構であったため, 2 日目に, ITER の建設状況を見学した。本体棟に隣接する組立棟の壁が姿を現し, 来る ITER での実験へ向けて ITPA の貢献の重要性が増していると認識した。

次回は, 「第14回磁気閉じ込め系における高速粒子に関する IAEA 技術会合」の直後に IAEA 本部にて行うこととなった。

2. 「MHD 安定性」

第25回となる本会合には、日本1名、欧州16名、米国11名、中国6名、ロシア3名、韓国2名、インド1名、ITER機構5名が参加した。会合では、ディスラプション、誤差磁場、新古典テアリングモード (NTM)、抵抗性壁モード (RWM) などについて活発な議論が行われた。

ディスラプション関連では、ITERのディスラプション緩和システム (DMS) の検討状況について説明があった。ITERのDMSでは大量ガス入射 (MGI) と粉碎ペレット入射 (SPI) を併用することが予定されている。MGIについては既存装置で多様な実験が行われ物理基盤が充実しているものの、SPIはDIII-Dでしか運用実績がないことから、ITERDMSの仕様を決定する上ではデータがまだ不足しているとの指摘があった。

NTMに関して、DIII-Dの最近の実験データを用いITERのNTM安定化の予測を再検討した結果が報告された。NTM磁気島が自発的に縮小する磁気島幅が以前得られた結果より広がったことなどから、電子サイクロトロン電流駆動 (ECCD) 位置のずれの許容値は若干緩和されるとの報告があった。一方で、ECCD幅が計算より広がるとの実験結果があり、これが顕著な場合はECCDによるNTM安定化効果が弱まるとの説明があった。

国際共同実験およびワーキンググループ活動の進展の報告を受け、既存の活動の継続/終了の議論、および新規に提案された活動の採否の議論を行った。その結果、進行中の国際共同実験10件は継続することにした。また、ワーキンググループ活動は、抵抗性壁モードの帰還制御に関する研究課題1件を終了し、残り6件を継続することにした。また、RWM制御のための検出器における低周波数ノイズの特性に関する新規の共同実験が1件提案され、本会合で承認した。

ITERに関連した物理課題の研究成果をまとめた「ITER Physics Basis」の改訂版の執筆についてITPA調整委員会から検討依頼があったことが議長より説明があった。ITER Physics Basisは1999年と2007年にNuclear Fusion誌に掲載されており、前回の掲載から約10年経過することから改訂の要否について審議した。本会合参加者からは、(1)ITER Physics Basisは専門分野の成果を参照するためだけでなく、専門外の分野の成果を参照する上で有用である、(2)学生や若手研究者を育成する上で有用である、(3)約10年という期間は改訂する上で適切な期間であるという意見が多くあった。一方、少数意見として、ディスラプション緩和など、研究分野によっては現在結論が出ていないことから時期尚早との意見などがあった。2007年版のITER Physics Basisに記載された結果からの進展を議論した結果、各研究領域において様々な進展があったことを確認した。これらの議論の結果、少数意見も考慮するものの、本トピカルグループとしては改訂に前向きとの回答をすることとした。

次々回以降の会合開催について議論した。従来、日本でITPA会合が開催される場合は日米MHDワークショップと合同で開催してきており、来年春がその時期となる。ま

た、来年10月にはIAEA核融合エネルギー会議が京都で開催されることから、ITPA会合はその次週に日本で開催される見込みである。連続して日本で開催されることについて本会合で議論したが参加者から異論はなかった。

3. 「統合運転シナリオ」

第14回の本会合はFusion for Energyで行われ、日本3名、欧州19名、米国7名、韓国3名、中国1名、ロシア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標準運転シナリオの開発に関する国際比較実験と今後の新規提案計画の議論、Hモードとプラズマ放電の終了シナリオ、プラズマ制御手法、粒子輸送ならびに先進運転シナリオのモデリング、に重点が置かれた。それ以外に、各国装置の現状や運転計画の報告、ITER Physics Basisの改訂に関する議論があった。

ITER機構からは、ITER計画およびITER機構の組織の状況と必要な検討事項等に関して報告があった。本トピカルグループに関わる事項として、ITER初期ヘリウム運転シナリオやITERプラズマ制御システム開発に関する実験とモデリング等が要請された。

ITER標準運転シナリオに関する国際比較実験については、DIII-DからITER相当の低トルク入射 ($0.5-1\text{ Nm}$) でもITER標準運転に相当する $\beta_N \sim 2$ 、 $q_{95} \sim 3$ 、 $H_{98y2} \sim 1$ を満たすプラズマが得られているが、トルク入射を 0 Nm とした場合でもプラズマ回転周波数は周辺部でITERの予測値よりも大きくなっていることが報告された。JETからは2013/2014年の実験データベースのまとめと2015/2016年実験キャンペーンでの想定加熱パワー ($<34\text{ MW (NB)}$ 、 $<8-10\text{ MW (IC)}$) 等が示された。

Hモードとプラズマ放電の終了シナリオについては、JETにおける加熱終了後のLモードへの逆遷移タイミングとプラズマ蓄積エネルギーの減衰率についての詳細な報告があった。加えて、ガス入射停止と同時にNB加熱を停止した場合に比べガス入射停止 0.2 s 後にNB加熱を停止した場合では、Lモードへの逆遷移タイミングが 0.5 s 以上遅れ、同程度のタンゲステン発生量ながらその間のタンゲステンの蓄積と逆遷移時の温度密度分布の挙動が異なるという結果が示された。またHモード終了シナリオのモデリングに着手した現状が報告された。今後各国装置からHモードとプラズマ放電の終了に関する実験データを提出して比較を進めることになった。

プラズマ制御手法については、KSTARからNBとEC加熱による電子温度分布の制御実験および電子温度と安全係数の制御シミュレーション結果が報告された。また欧州で開発を進めている実時間輸送コードRAPTORを用いたプラズマ輸送モデルに基づく予測ベースのプラズマ制御コントローラによるITERハイブリッド運転シナリオのシミュレーション結果と、ASDEX Upgradeにおける予測検証の取り組みが紹介された。

粒子輸送のモデリングに関しては、原子力機構の林から炭素とアルゴンの不純物輸送を考慮した JT-60SA コアプラズマのシミュレーション結果が示され、セバトロクスでの密度を高くすることはダイバータ板への熱負荷低減だけでなく不純物のコアへの蓄積を防ぐことにも重要であること等が報告された。

次回の会合では、国際比較実験等の通常の議論に加え、先進運転シナリオ実験、ITER 標準運転シナリオのモデリング、加熱・電流駆動に関するモデリング、および第26回 IAEA 核融合エネルギー会議（2016年）のグループ論文提案に関する議論を重点的に行う予定である。

4. 「輸送と閉じ込め物理」

第14回となる本会合は、当初は3月にインドで開催される予定だったが、現地において豚インフルエンザが流行したため、5月 ITER 機構での開催となった。欧州10名、米国6名、韓国1名、インド1名、ITER 機構1名が参加した。また、日本の5名を含む十数名の研究者が TV 会議に参加した。会合は不純物粒子輸送、タングステン壁における L-H 遷移パワースケーリング、H/He プラズマにおける H モードアクセス、3次元磁場のコアプラズマへの影響、モデリング、国際共同実験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。

はじめに新議長長の Mantica 氏から、ITPA 調整委員会の報告がなされた。本グループには ITER の閉じ込め性能予測に向けて、金属壁とハイブリッド運転等を考慮した閉じ込めスケーリングの構築が要求されていること、また全グループにおいて、Nuclear Fusion 誌の ITER physics basis の改訂が要求されていることが報告された。ITER における重要な課題解決に向けて、Mantica 議長は、今後2回の会議においては、課題解決に直結する特定のトピックについて、数人の専門家で議論する分科会を強化する意向を示した。

不純物粒子輸送のセッションでは、ITER 機構から ITER におけるタングステン不純物のコア部への蓄積について、新古典輸送と乱流輸送モデル (GLF23) を用いたシミュレーション結果が報告された。コア部でのタングステンの輸送は、新古典効果による密度ピーキングが効くこと、15 MA 運転よりも外部加熱割合の多い 7.5 MA 運転の方がタングステンの蓄積が小さいことが予測された。JET と ASDEX Upgrade においては、それぞれイオンサイクロトロン波共鳴加熱 (ICRH) と電子サイクロトロン波共鳴加熱

(ECH) により、タングステン不純物の蓄積の抑制が観測されている。両装置とも、背景プラズマの分布の変化や乱流輸送が増加しており、これらの影響でタングステン不純物の輸送も増大するという解釈がなされた。加えて、JET では ICRH 入射時の少数イオン加熱による高 Z 不純物へのスクリーニング効果、ASDEX Upgrade では ECH 入射時の鋸歯状振動の変化に伴うタングステン不純物輸送の増加が考えられることが示された。

タングステン壁における L-H 遷移パワースケーリングのセッションにおいては、主に研究方針の議論がなされた。実験研究の順序は、既存の実験データを用いて傾向を調べることに、特定の装置において詳細なパラメータスキャンを行うこと、装置間で結果を比較すること、統計解析により L-H 遷移パワースケーリングを構築することの順に進めることが提案された。スケーリングを構築するための分布データだけではなく、乱流計測と乱流シミュレーションを組み合わせてタングステン壁での L-H/H-L 遷移の理解も視野に入れることが提案された。理論研究者からは、乱流計測と乱流モデルの比較方法や、低密度領域と高密度領域に分けて解析する方法などが提案された。

装置間比較実験および共同研究では、Iモード特性、自発回転スケーリング、LOC（密度と閉じ込めが線形な関係である領域）から SOC（閉じ込めが飽和状態にある領域）への遷移特性、運動量輸送と粒子輸送の関係について、進捗と今後の予定が報告された。

3次元効果のセッションでは、近年注目を集めている低 n の外部共鳴摂動磁場印加時のトロイダル回転の変化（ブレイキ）についての最新のモデリングの成果を中心に議論が進められた。リップル率を柔軟に変化させられる JET において $n=1$ の外部磁場を印加したときにはリップルを 0.1% 未満から 0.8% まで徐々に増加させてもトロイダル回転は小さな値に留まり変化がなく、オフセット回転速度と考えられると報告された。抵抗性 MHD モデルにトロイダル回転ソルバを組み合わせた MARS-Q コードは線形のプラズマ応答や簡易的なモデルに基づく新古典トロイダル粘性を考慮できるが、より正確なモデルを用いた新古典トロイダル粘性とのずれは大きく、実験との定量的な比較はまだ途上のような状況だった。統合モデルによる回転予測能力の獲得・向上や DIII-D など活発に摂動磁場印加実験が行われている装置でのモデルベンチマークなどが今後ますます重要になると見られている。