



インフォメーション

■ITPA (国際トカマク物理活動) 会合報告(40)

●分野: 「スクレイプオフ層およびダイバータ物理」¹, 「統合運転シナリオ」², 「MHD 安定性」³, 「高エネルギー粒子」⁴, 「輸送と閉じ込め物理」⁵, 「ベデスタル物理」⁶

●開催日: 2013年3月19日-22日¹, 2013年4月15日-18日², 2013年4月22日-25日³⁻⁵, 2013年4月22日-24日⁶

●場所: 合肥(中国)¹, カダラッシュ(フランス)², カラム(イギリス)³⁻⁴, ガルヒン(ドイツ)⁵⁻⁶

担当委員:

朝倉伸幸(原子力機構)¹, 芦川直子(核融合研)¹, 上田良夫(阪大)¹, 大野哲靖(名大)¹, 坂本瑞樹(筑波大)¹, 仲野友英(原子力機構)¹, 増崎貴(核融合研)¹, 井手俊介(原子力機構)², 鈴木隆博(原子力機構)², 長崎百伸(京大)², 中村祐司(京大)², 花田和明(九大)², 林伸彦(原子力機構)², 福山淳(京大)², 諫山明彦(原子力機構)³, 榊原悟(核融合研)³, 古川勝(鳥取大)³, 政宗貞男(京都工繊大)³, 松永剛(原子力機構)³, 山崎耕造(名大)³, 渡邊清政(核融合研)³, 篠原孝司(原子力機構)⁴, 東井和夫(核融合研)⁴, 藤堂泰(核融合研)⁴, 長壁正樹(核融合研)⁴, アンドレアス・ビアワーゲ(原子力機構)⁴, 村上定義(京大)⁴, 山本聡(京大)⁴, 本多充(原子力機構)⁵, 吉田麻衣子(原子力機構)⁵, 坂本宜照(原子力機構)⁵, 宮戸直亮(原子力機構)⁵, 田中謙治(核融合研)⁵, 田村直樹(核融合研)⁵, 井戸毅(核融合研)⁵, 相羽信行(原子力機構)⁶, 浦野創(原子力機構)⁶, 大山直幸(原子力機構)⁶, 神谷健作(原子力機構)⁶, 鈴木康浩(核融合研)⁶, 中嶋洋輔(筑波大)⁶, 森崎友宏(核融合研)⁶

(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
スクレイプオフ層とダイバータ物理	2014年1月20日-23日	金沢(日本)
統合運転シナリオ	2013年10月7日-10日	福岡(日本)
MHD 安定性	2013年10月上旬	合肥(中国)
高エネルギー粒子物理	2013年9月22日-24日	北京(中国)
輸送と閉じ込め物理	2013年10月7日-9日	福岡(日本)
ベデスタル物理	2013年10月7日-9日	福岡(日本)

1. 「スクレイプオフ層およびダイバータ物理」

今回の第18回会合は, 中国科学院プラズマ物理研究所(合肥)で開催され, 合計87名の参加があった: 中国60名, 欧州13名, 米国5名, 日本4名, 韓国2名, ITER 機構3名. 中国から60名の参加があり, 中国各地の研究機関や大学から核融合以外の分野(材料工学やプロセスプラズマ関係など)の若い研究者も多く参加していた.

ITER 機構から依頼された物理課題, すなわちプラズマ輸送と定常およびパルス熱負荷の評価・制御, タングステンのプラズマ対向特性全般, ベリリウム第一壁およびタン

グステン・ダイバータ材の損耗堆積・水素蓄積・ダストを総合的に検討した. 特に今回の会合では, ITER 運転の開始後10年間にわたり(従来の計画である炭素材部分をすべてタングステン材とした)「フルタングステン・ダイバータ」で実験を行う ITER 機構からの提案に関して, 主要な物理課題である(1)定常およびパルスの熱負荷によるタングステン対向材に関する評価(代表: Coenen), (2)トリチウムの容器内への蓄積・除去およびダストの評価(代表: Tsitrone), (3)水素同位体およびヘリウムプラズマ照射によるタングステンの表面変化やベリリウムとの合金化による影響の評価(代表: 上田), (4)ダイバータ運転やプラズマ放電への蓄積・制御, コンディショニングなどに関する評価(代表: Brezinsek), の総括が行われた.

フルタングステン・ダイバータでの運転開始について, 炭素-タングステン・ダイバータを5年間使用する従来の計画と比較して, (1)定常的な熱負荷の限界は同程度であるが溶融部分が発生すると損傷が拡大する可能性が高いため慎重なダイバータ運転と広範囲の監視が必要であること, (2)ディスラプション試験や緩和実験に対して熱負荷評価の精度を高めること, (3)初期のELMの緩和実験期間において, 繰り返しパルス熱負荷によりタングステン材の再結晶化やヘリウム照射による表面脆化を最小限にすることが重要であり, ヘリウムプラズマでの運転時間や, ELMパルスの強度と繰り返し数などの指標を提案すること, (4)第一壁材であるBeの照射により生成されるW合金の性能評価を進めること, など初期実験運転に大きく影響を及ぼす課題が総括された. また, 本グループとしては ITER 機構の決定とは別に炭素-タングステン・ダイバータの物理検討も続けるとのコメントが追記された.

ITER 機構が現在発表している実験スケジュールでは, 運転開始5年後にダイバータの交換を行わずにトリチウム実験を行うことになっており, ダイバータ交換を行うと ITER プロジェクトの目標達成が遅れることになる. 考えられるリスクを最小限にする研究を今後を進め, フルタングステン・ダイバータでの開始を優先せざるを得ないと思われる.

本会合において ITER 機構の代表者より, ITER 日本国内機関(JAEA)が製作した炭素-タングステン・ダイバータ実規模プロトタイプユニットに関する熱負荷試験(最大20 MW/m², 10秒間を800サイクル)がロシアのエフレモフ研究所で本年実施され, 大きなプラズマ熱負荷が予想されるタングステン部分についても問題なく成功したことが報告され, ITPA 参加の研究者からも高く評価された.

2. 「統合運転シナリオ」

第10回の本会合には, 日本3名, 欧州18名(うちTV会議参加1人), 米国10名, ロシア2名, ITER 機構7名が参加

した。

統合運転シナリオ・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を提案することが主な役割である。会合の主要な内容は、グループから提案している国際装置間比較実験（ITER標準・定常運転シナリオの開発、加熱／電流駆動手法の開発、プラズマ複合制御の開発等）の進展の確認と今後の展開に関する議論、ITERの運転シナリオやアクチュエータ等による加熱／電流駆動／トロイダル回転駆動、プラズマ複合制御に関するモデリング活動の現状の報告と今後の構成に関する議論であった。また、各国装置の現状や運転計画の報告も行われた。

今回は特に、ITERで最初からタングステン・ダイバータを導入する場合について考えられる課題等の議論を行った。運転シナリオの点、特にプラズマ立ち上げの視点からは大きな問題はないというのが共通の認識であった。ただし、リミターからダイバータに移行するタイミングやHモード遷移のタイミング等によっては立ち上げ時にタングステンがプラズマ中に混入する可能性はあるとの指摘があった。議論の結果やJT-60U、JET、ASDEX-Upgrade (AUG)等のタングステン実験データも含めて議長がITPA調整委員会に報告を行う予定である。

ITER機構からは、組織のメンバーの変更とITER計画の進展、ITERの制御システム開発の現状に関して報告があった。統合運転シナリオに関わる検討事項として、タングステン等の高Z材料のダイバータを使う場合の運転シナリオの調査・検討（例えば、プラズマ電流の立ち上げ速度やダイバータ配位に移行するタイミング、ダイバータ配位への移行を早めた場合の運転可能領域、等）を要請された。これに関連した制御課題として、不純物入射等によるダイバータへの熱流制御の調査・検討も併せて要請された。

国際装置間比較実験の現状と今後の実験予定に関して報告があった。AUGからは、ITER標準運転の模擬実験結果とともに、ヘリウムプラズマの実験でELMが小さくなることが報告された。DIII-Dからは、定常運転シナリオとして高い内部インダクタンスのプラズマを実験とモデリングで検討した結果が報告され、閉じ込めとMHD不安定性限界、中心での電流駆動効率が高くなる利点を示された。

運転シナリオや加熱／電流駆動、燃焼制御に関するモデリングの報告があり、それを基に議論を行った。今回は特に、不純物と燃料粒子の輸送シミュレーション結果の報告が多かった。その中で、福山（京大）は、ITERプラズマの運動論的統合モデリングの現状について報告し、燃料イオンの詳細な速度分布は核融合反応率にそれほど影響しなく、径方向拡散のエネルギー依存性が高エネルギー粒子形成と核融合反応パワーに強く影響することを示した。井手（原子力機構）は、ITERの先進誘導放電におけるトロイダル回転分布の予測シミュレーションの結果について報告し、ITERでは中性粒子ビームのトルク入力による回転以上に自発トルクによる回転が大きくなる可能性があることを示した。林（原子力機構）は、グループに提供したJT-60Uの内部輸送障壁（ITB）の実験データを用いた輸送

モデルの検証結果について報告し、電流拡散パルーニングモードモデルとボーム・ジャイロボームモデルで実験に近い温度分布が得られるが、強いITBのいくつかの放電では新古典輸送が大きいためイオン温度が実験より低くなることを示した。

この他、比較実験と共同モデリングに関しての次回会合までの検討事項等を取り決め、会合を終了した。

3. 「MHD 安定性」

改組後第10回となる本会合は、日本1名、欧州13名、米国15名、ロシア2名、インド2名、韓国1名、中国4名、ITER機構2名の参加のもとで開催され（人数は概数でテレビ会議参加を含む）、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）、鋸歯状振動などの報告が行われた。前回同様ディスラプションに関するトピックスに多くの時間が割り当てられた。また、逃走電子に関するセッションの一部は高エネルギー粒子トピカルグループ（EP TG）と合同で行われた。

ディスラプションに関しては、不純物入射によるディスラプション緩和に関するデータベース（AUG、Alcator C-Mod (C-Mod)、DIII-D、JET、JT-60U、MASTなどが参加）の結果が提示され、夏頃を目処に論文化することで進めることになった。ITERでは逃走電子を抑制・制御することが重要であるが、逃走電子の位置制御は電源容量の点から困難とのDINAコード解析結果が以前出されていた。今回、ディスラプションを発生1秒程度前に予測して中立点に移動させればプラズマ電流が2 MA程度になるまで制御できる可能性があることが示された。

NTMおよび誤差磁場に関連して、外部磁場をトロイダル方向に回転させることによりNTM磁気島の回転を制御したDIII-Dの結果が紹介されるとともに、これをLocked Modeの回避に適用する予定について報告があった。

RWMに関しては、共同実験やワーキンググループ（WG）活動の進展などが報告された。RWM制御に向けたノイズ解析では、AUG、DIII-D、JET、JT-60U、MAST、NSTXの高ベータ放電における高周波ノイズの解析結果が報告された（低周波ノイズについては以前報告済）。このWGは終了し、今後、ノイズ存在下でのRWM制御のための3次元モデリングに関する新しいWGを立ち上げることになった。

鋸歯状振動制御の新しい手法として、トカマクとして運転したRFXにおいて、外部磁場によりポロイダルモード数 $m=2$ 、トロイダルモード数 $n=1$ の強度を制御することにより、鋸歯状振動強度を抑制（抑制中は $m/n=1/1$ の振動が継続）した結果が紹介された。

ITERにおけるフルタングステン・ダイバータでの運転開始に関連して、MHD安定性トピカルグループとしての見解を今回の会合で審議した。本会合での議論の結果、タングステンタイル導入に伴い予想されるディスラプションおよびコア部不安定性に関する実験および理論の最近の結果として、タングステンタイル導入により電流クエンチ時間が長くなることは逃走電子発生の観点からは好ましい

が、放射損失の減少によるダイバータ熱負荷の増加や電磁力の増加が懸念されるといった実験結果が報告されていることや、磁気島への不純物蓄積により磁気島が成長するモデルが最近提示されていることを紹介することにした。また、「タングステンタイルを用いる場合、ディスラプション緩和や不安定性制御のためのシステムの信頼性を実験初期から高くしておく必要がある。また、これらのシステムが堅牢でかつ多くの学習時間を要さないようにするために更なる R&D が必要である。」と提言することにした。

4. 「高エネルギー粒子物理」

本会合は第10回となり、約35名の参加、31件の発表があった。共同実験では、局在化したアルヴェン固有モード(AE)による高速イオンの損失と再分布を扱う共同研究(EP2)については、これまでの枠組みでの成果を取りまとめ、終了することとした。今後の後継となる共同研究について議論し、コードのベンチマークやモデル構築に貢献できるようなデータベース作成を指向した活動が提案された。AEの非線形時間発展を扱う共同研究(EP4)では新たにTJ-IIより、安全係数の発展に対応してバースト状と連続状の振る舞いの遷移が見られる興味深いデータが提供された。共鳴磁場摂動(RMP)コイルの影響を扱う共同研究(EP6)では、DIII-Dでプラズマレスポンスを考慮した磁場を利用した高速イオン損失と損失高速イオンプローブによる実験計測との比較が実施され、真空磁場を用いた場合よりも適切に実験を再現していることが報告された。また、ECHによるAEの制御を扱う共同研究(EP7)について、TJ-IIとHL-2AよりECHによるAEの抑制の報告があった。

線形コードのベンチマーク活動は、ITERの15 MAシナリオの安定性解析、DIII-DのTAE実験に対するコードの妥当性評価、JET DT実験のシナリオ作成を指向した安定性解析を行うことで進めることとした。JET DT実験に絡んでICRFによる高速イオン分布のモデルについて、今後検討を進めることとなった。

非線形コードのベンチマーク活動は、不安定性飽和過程の解明を目的とした高速粒子位相空間解析の報告がBriguglio氏よりあった。一方で、Breizman氏よりモードの飽和を議論する際の高速イオンの発生源と消失機構の導入が重要であるとの主張があり、位相空間解析と発生・消失機構導入の双方について引き続き検討することとした。

数値シミュレーション関連の報告では、ITERにおけるAEやMHD不安定性による高速イオン輸送が初めてMEGAにより実施され、報告された。現在の15 MAシナリオでは30%程度の高速イオン分布の変化が起りうるという結果であったが、 q 分布が0.1上昇するとこのMHDは消滅した。運転シナリオに与える影響や運転シナリオの再検討は、統合運転シナリオ(IOUS)トピカルグループ等で実施する必要があると考えられる。

テスト粒子による高速イオン閉じ込め評価に関連して、ITERでのELMコイル磁場擾乱中でのアルファ粒子閉じ込めに関する計算結果が原子力機構のコードと欧州のコードとで異なることが前回の会合で報告された。今回の会合

で、欧州のコードのアルファ粒子発生手続きにミスがあったためである旨が報告され、原子力機構のコードによる結果が正しかったことが確認された。

JETでは2017年にDT実験が予定されている。アルファ粒子の振る舞いやAEに関する重要な知見がITERのDT実験の前に得られるチャンスである。本会合では、Sips氏がJETのDT実験計画の概要を発表した。EP TGではJETのDT実験への貢献あるいは有効利用を念頭に活動を行う。

5. 「輸送と閉じ込め物理」

4日間にわたった本会合(第10回)は、一部セッションをベデスタル物理トピカルグループと合同で開催した。32名(日本2名、欧州14名、米国8名、インド2名、韓国1名、ITER機構1名、テレビ会議参加4名(欧米中日))が出席した。

イントロダクションでは共同実験の中でもITER機構においてとりわけ緊急性が高いとされる6つの課題が紹介され、その話題を中心に議題が構成された。9つのセッションのうち、ベデスタルグループと合同であったITERに向けたダイバータ戦略、L-H遷移(上記2セッションはタングステン・ダイバータに関連して議論された。詳細は「ベデスタル物理」を参照。)、燃料供給の3セッションの他、次回のIOSトピカルグループとの合同セッションに向けた議題、3次元物理、乱流・閉じ込め、粒子輸送、回転、分科会セッションにおいて、報告および議論がなされた。

燃料供給のセッションでは、中性粒子やペレットによる輸送への影響が議論された。主に周辺乱流シミュレーションに用いられるXGC1コードはDEGAS-2コードと組み合わせ中性粒子挙動を解いており、中性粒子の存在が周辺乱流を大幅に増大させることが報告された。また、MASTではペレット入射直後のホロー密度分布における乱流の安定性についての解析が進められている。

3次元物理のセッションでは、まずLHDよりRMPで増加した周辺での粒子拡散係数はRMP電流ではなく磁気島幅の関数となっているほか、RMP印加により揺動振幅は減少しているという興味深い現象が報告された。また、DIII-Dにおけるテストブランケットモジュール電流が引き起こすトロイダル回転減少実験の解析や、ジャイロ運動論コードGYSELAによるリップルの乱流・新古典輸送への影響を調べたシミュレーション結果などが報告された。

乱流・閉じ込めのセッションでは、主要なジャイロ運動論フラックスチューブコードのベンチマーク活動の順調な進展が報告された。また、複数のDIII-D Lモード放電においてジャイロ運動論コードの予測する輸送レベルが周辺領域において実験解析よりも過小評価(shortfall)となることが知られているが、安全係数 q_{95} をおおよそ揃えたC-ModやAUGにおいてはみつかっていないという結果となった。幾何形状効果、安全係数依存性、ジャイロボーム規格化因子の選択(主半径、小半径、温度の特性長)などがshortfallの可能性としてあげられていた。

粒子輸送のセッションにおいて、リチウム添加前は炭素

密度は新古典予測と一致しているが、添加後は異常輸送がないと説明できないとの NSTX の結果が示された。低価数不純物密度分布データベースが AUG, C-Mod, DIII-D の 3 装置から開始され、今後も装置を増やして拡張していく旨が確認された。また、DIII-D からはガスパフ変調実験によって得られた摂動的な粒子の拡散係数、対流速度が TGLF の計算結果とおおよそ一致しているという興味深い結果が示された。

プラズマ回転のセッションでは、C-Mod において密度ピーキングが運動量ピンチを減殺しているという観測が得られたほか、AUG ではコアの自発トルクが密度の特性長と実行衝突周波数に強く相関しているとのことであった。また、同じく AUG においてコアでの自発回転は周辺の効果の影響を受けない旨が報告された。一方、JET のような大型装置では、中性粒子ビーム入射によるトルクが主要となり、残留応力による自発回転トルクの存在を示す証拠は得られなかったと報告された。また、運動量ピンチのスケーリングは新古典解析によって不純物から重水素の回転へと焼き直した上で再評価すべきとの指摘があった。

6. 「ペDESTAL物理」

本会合には32名（欧州18名、米国5名、中国5名、日本2名、ITER 機構1名、韓国1名）の参加者があった。ペDESTAL構造、ELMの物理と周辺部安定性、ITERにおけるダイバータ交換ストラテジー、RMPを用いたELM制御、LH遷移物理、ペレットによる燃料補給とELM制御等のセッションにおいて、各装置での最新の実験結果と国際装置間比較実験に関する討議が行われた。

ペDESTAL構造形成のセッションでは、ペDESTAL構造予測モデルである EPED モデルの適用限界について議論し、温度と密度のペDESTALを別々に取り扱うためには拘束条件が足りないとの説明があった。また、チェコ共和国のトカマク装置 COMPASS が始めて改善閉じ込めモード (H-mode) プラズマを得たとの報告があり、今後の貢献が期待された。

ELM 物理と周辺部安定性のセッションでは、非線形 MHD シミュレーションコード (JOREK や BOUT++) を用いて AUG, EAST, MAST 等の ELM ダイナミクスの研究が行われ、ELM のフィラメント構造との比較が始まった。

また、金属壁装置における線形 MHD 安定性解析結果を見ると、 $S-\alpha$ ダイアグラム上で安定領域にいるにもかかわらず ELM が発生しており、高 Z 不純物が安定性に与える影響を理解する必要がある。

輸送と閉じ込め物理トピカルグループと合同で開催した ITER におけるダイバータ交換ストラテジーのセッションでは、報告書作成に向けて、低閉じ込めモード (L-mode) 運転、H-mode 遷移、H-mode 運転、H-mode 性能、He プラズマ運転の各章の執筆者から概要説明があった。初プラズマからタンゲステン・ダイバータを導入した場合の追加リスクとして、低密度での H-mode 運転が難しいこと、ペDESTAL性能を改善するために低 Z 不純物を導入する必要があることが指摘されたものの、それ以外の項目では大きな懸念はないとの判断になった。また、He プラズマ運転時は軽水素ペレットしか使えないため、密度を上げるためにペレットを入射すると軽水素の割合が増えて H-mode 遷移に影響がでる可能性が指摘された。

RMP コイルを用いた ELM 制御については、各装置の最新の実験結果や非線形 MHD シミュレーションコードや kinetic コードを用いた ELM 安定化機構の研究結果が報告された。DIII-D の RMP 実験の解析に向け開発している MIPS コードと NIMROD コードのベンチマーク結果が鈴木 (核融合研) より報告され、DIII-D における軟 X 線計測結果との直接比較が期待された。

輸送と閉じ込め物理トピカルグループと合同で開催した LH 遷移物理のセッションでは、ITER で重要な電流ランプアップ中の H モード遷移閾値パワーに関する実験結果が C-Mod と TCV から報告され、両装置とも電流ランプアップ率を変化させても遷移閾値パワーは変わらないことが確認された。

ペレットによる燃料補給と ELM 制御については、AUG や EAST における ELM 制御実験の結果や DIII-D や ITER におけるペレット駆動 ELM 発生の非線形シミュレーションについて報告があった。AUG の新しいペレット入射装置の結果では、ペDESTAL部の電子温度によって ELM が駆動できる条件が変わることが見出された。ITER における ELM 制御手法としてペレット入射を適用するためには、同一磁気面上で圧力が一定になる前に発生するペレット駆動 ELM の理解が急務である。