

■ITPA（国際トカマク物理活動）会合報告(34)

●分 野：「MHD 安定性」¹，「輸送と閉じ込め物理」²，「統合運転シナリオ」³，「ペデスタル物理」⁴，「高エネルギー粒子物理」⁵，「計測」⁶

●開催日：2011年10月4日－7日¹，2011年10月5日－7日²，2011年10月18日－21日³，2011年10月4日－6日⁴，2011年9月12日－13日⁵，2011年10月17日－20日⁶

●場 所：パドバ（イタリア）¹，カダラッシュ（フランス）²，京都（日本）³，ヨーク（英国）⁴，オースチン（米国）⁵，合肥（中国）⁶

担当委員：

諫山明彦(原子力機構)¹，榊原悟(核融合研)¹，古川勝(東大)¹，松永剛(原子力機構)¹，山崎耕造(名大)¹，渡邊清政(核融合研)¹，井戸村泰宏(原子力機構)²，坂本宜照(原子力機構)²，田中謙治(核融合研)²，田村直樹(核融合研)²，矢木雅敏(九大)²，吉田麻衣子(原子力機構)²，井手俊介(原子力機構)³，鈴木隆博(原子力機構)³，長崎百伸(京大)³，中村祐司(京大)³，花田和明(九大)³，林伸彦(原子力機構)³，福山淳(京大)³，相羽信行(原子力機構)⁴，浦野創(原子力機構)⁴，大山直幸(原子力機構)⁴，神谷健作(原子力機構)⁴，北島純男(東北大)⁴，中嶋洋輔(筑波大)⁴，森崎友宏(核融合研)⁴，長壁正樹(核融合研)⁵，篠原孝司(原子力機構)⁵，東井和夫(核融合研)⁵，藤堂泰(核融合研)⁵，濱松清隆(原子力機構)⁵，村上定義(京大)⁵，山本聡(京大)⁵，伊丹潔(原子力機構)⁶，河野康則(原子力機構)⁶，川端一男(核融合研)⁶，草間義紀(原子力機構)⁶，笹尾眞實子(東北大)⁶，ピーターソン・バイロン(核融合研)⁶，間瀬淳(九大)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
MHD 安定性	2012年3月5日－9日	土岐（日本）
輸送と閉じ込め物理	2012年4月2日－5日	合肥（中国）
統合運転シナリオ	2012年4月16日－19日 （または17日－20日）	マドリッド （スペイン）
ペデスタル物理	2012年4月2日－4日	合肥（中国）
高エネルギー粒子物理	2012年3月5日－9日	土岐（日本）
計測	2012年5月14日－17日	モスクワ （ロシア）

1. 「MHD 安定性」

改組後第7回（通算では第18回）となる本会合はイタリア・パドバのRFXコンソーシアムで10月4～7日に開催された。会合では遠隔参加を含め，日本（3名），EU（18名），米国（15名），ロシア（2名），インド（2名），中国（1名），ITER機構（3名）の参加があった。会合では，ディスラプション，誤差磁場，鋸歯状振動，新古典テアリングモード（NTM），抵抗性壁モードなどの課題に関する報告，共同実験およびワーキンググループ活動に関する報告・審議が行われた（共同実験やワーキンググループ活動の研究課題の詳細はITPAのWebページを参照）。

ディスラプションに関しては，ITERのディスラプション緩和システム（DMS）の検討が現在進められていること

もあり，熱クエンチ時の放射損失のトロイダル方向非対称性の緩和，垂直位置移動現象および速い電流クエンチの緩和，逃走電子の抑制・制御に関する報告が多くあった。ガスジェット装置の増設（Alcator C-Mod），プラズマに近接した（～0.1 m）バルブの導入（TEXTOR），高磁場側からのガスバフ装置の導入（ASDEX Upgrade），カートリッジ式ガス入射装置の導入（Tore Supra）など，様々なガス入射方式でのディスラプション緩和特性に関する報告があった。また，逃走電子発生時に電子サイクロトロン加熱を行うと逃走電子が増加する場合（高速電子の生成に起因）と減少する場合（一周電圧の低下に起因）があるとの報告がHL-2Aよりあった。

誤差磁場に関しては，ITERにおいて許容される誤差磁場の評価およびプラズマ応答を予測するため，共同実験による実験則の確立と理論モデルの構築が進められている。LHDからは共鳴磁場摂動（RMP）を用いた際の磁場遮蔽効果の磁場配位依存性について，磁気シアの低下に伴い磁場遮蔽の閾値が低下する傾向にあるとの報告があった。また，DIII-Dからは，ロックしたNTMに対し回転するRMPを加えてRMPに同期するようにNTMを回転させパワー変調した電子サイクロトロン波が磁気島のO点に入射されるようにして安定化させた結果が報告された。

共同実験は現在9つの研究課題が進められている。このうち1つの研究課題（MDC-4）でデータ取得が終了したことから終了することになり，残りの研究課題は継続されることになった。また，プラズマ制御に関する研究課題が新たに提案された。

ワーキンググループ活動は，ITER機構から提示された検討課題に対し参加極が検討を行う活動であり，第3回会合（2009年10月）から始まった。過去のITPA会合で経過報告とともに内容に関する審議が行われてきた。今回，9つのワーキンググループ活動のうち4つ（WG-3～6）が最終報告書を提出して終了することが報告された。また，ハロー電流のモデリングに関するワーキンググループの活動が新たに始まることが報告された。

今回の会合でA. Sen氏がMHD TGの議長を務めるのが最後となることから，会合の最後にA. Sen氏より挨拶があった。次期議長はE. Strait氏である。

2. 「輸送と閉じ込め物理」

本会合（第7回）には45名（日本2名，欧州21名，米国12名，ロシア3名，インド2名，韓国1名，ITER機構4名）が出席した。

本会合のセッションは，ITER予測に向けた装置間比較実験，Hモードワークショップのグループ論文について，輸送モデルの検証，コアと周辺の境界領域での輸送特性，3次元磁場の乱流や輸送への影響（ステラレータとトカマクの比較），不純物輸送の研究で構成され，それぞれの報告および議論が成された。装置間比較実験では，主に閉じ込めのベータ値依存性，運動量輸送や残留応力（自発回転の駆動源）のスケリングの構築， $H_H \sim 1$ 近辺での輸送特性，異なる粒子種におけるLH遷移パワー，低アスペク

ト比プラズマでの輸送特性、分布の硬直性、Iモード特性に関して、研究の進展と結果が報告された。

オープニングセッションでは、議長による本会合の主旨説明や、W. Houlberg (ITER) から ITER に向けた物理研究に関して説明があった後、Hモードワークショップのグループ論文(2件)について、ポスター形式による議論を行った。1件は吉田(原子力機構)が2009年より持続的に進めてきた装置間比較による運動量輸送研究であり、他1件は閉じ込め改善度 $H_H \sim 1$ 、且つ LH 遷移パワーに近い運転領域での閉じ込め特性に関する論文である。

輸送モデルの検証では、電流ランプアップ時の GLF23モデルと実験との比較に関する報告があり、周辺部では GLF23モデルに加え付加的な輸送が必要であるとの見解であった。ASTRA と CRONOS シミュレーションを DIII-D のプラズマについて行い、平坦な実効電荷分布と計測した電子温度分布を用いることで、安全係数の時間変化をよく再現できたとの報告があった。

コア部と周辺部の境界領域 ($r/a \sim 0.6-0.9$) での輸送特性の研究では、主にモデリング・シミュレーションを用いた研究報告と議論が成された。ITG-TEM 乱流のみでは説明が出来ず、周辺部 ($r/a > 0.9$) での抵抗性バレーニングモードの存在とその影響が考えられることや、EGAM と ETG が相互作用することにより周辺部での粒子のピンチが現れるとの報告があった。また、EMEDG 3D コードによると、RMP コイルが作る摂動が小さいならば、エネルギー閉じ込めの減少を少なくできるとの報告があった。

3次元磁場の乱流や輸送への影響では、ヘリカルとトカマクでの結果に関するオーバービューがあり、DIII-D では RMP 印加時に密度の減少が観測されるが、TEXTOR では密度が減少する場合もあれば、粒子閉じ込めが改善する場合もあることを示し、この原因として、RMP と有理面の相互作用が重要であるとの知見を示した。LHD ではローカル・アイランド・ダイバータ用の $m/n = 1/1$ 外部印加磁気島のトロイダル方向の位相を変えることにより、電子温度、密度に大きな変化があることを見出し、新しいプラズマ分布の制御の可能性を示した。田中(核融合研)は、高イオン温度放電でジャイロ運動論コード GKV-X を用いた線形計算と乱流揺動計測の比較について報告した。イオン温度勾配が上昇してイオン温度勾配不安定性が励起される場合、異常輸送によるイオンの熱流束は GKV-X を用いておよそ説明できることを報告した。DIII-D では RMP 印加後、ELM が抑制されるが、同時に密度の減少が観測されている。ビーム放射分光 (BES) を用いた揺動計測の結果、 $r/a \sim 0.9$ よりも内側で長波長の揺動成分 (数百 kHz) が増加しており、ペデスタル領域 ($0.9 < r/a < 1$) での揺動強度は若干増加している程度であったとの報告があった。

不純物輸送研究では、ASDEX Upgrade でのボロンの輸送に関する報告があった。ここでは、NB 加熱プラズマに ECH を入射した方がボロン密度も電子密度もピークする結果が示され、この時、温度勾配もトロイダル回転も減少しているとの報告があった。JET では、ヘリウム密度はカーボン密度よりもピークすることが L および H モードで

観測されたことと、ヘリウムの蓄積としては $\sim 2-4\%$ 程度との報告があった。また、ジャイロ運動論のシミュレーションを用いた不純物輸送の初期的な結果について報告があった。

装置間比較実験のセッションでは、全部で13件の報告があった。また、新たな装置間比較研究として、LH 遷移後の輸送特性と非局所的輸送研究が提案された。尚、任期満了に伴い本グループの議長は S. Kaye 氏から D. McDonald 氏に交代する。

3. 「統合運転シナリオ」

第7回会合が京都大学楽友会館で開催された。今回の会合には、日本(11人)、欧州(12人)、米国(6人)、ロシア(1人)、韓国(2人)、中国(1人)、ITER 機構(6人)が参加した(テレビ会議参加も含む)。

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。そのために国際装置間比較実験とモデリング活動を両輪として進めている。今回も、国際装置間比較実験の進展報告と今後の計画の策定、ITER の運転シナリオや加熱・電流駆動に関するモデリング活動の現状報告と今後の計画に関する議論を行った。モデリング活動についても国際装置間比較実験同様のサブグループ化を行って作業を進めている。

ITER 機構からは、ITER 計画の進展の現状と物理課題検討の現状および ITER における制御に関して報告があった。統合運転シナリオに関する事項としては、標準・ハイブリッド運転のシナリオシミュレーションのデータ蓄積が進んだこと、今後特に力を入れることとして定常運転シナリオのシミュレーションや、MHD 安定性、フィードバック制御、消費磁束を低減するための電流立ち上げ中の加熱等を考慮した新しいシナリオの検討等が示された。

各装置から現状と今後の実験予定に関して報告があった。JET から統合運転シナリオ関連の実験予定とともに、主なプラズマ対向壁をタングステンにした ILW (ITER Like Wall) の実験で、以前の炭素壁と同等の ohmic プラズマが得られたとの初期結果が報告された。LHD からは、高温度モード、高周波加熱と定常運転の最近の結果について、武藤(核融合研)が報告した。Heliotron J/TJ-II からは、高周波を用いたプラズマ立ち上げ実験について、長崎(京大)が報告した。JT-60 からは、ハイブリッド・定常運転のプラズマとその形成方法について井手(原子力機構)が報告を行った。

国際装置間比較実験に関しては、12件の実験提案について、その現状と今後の予定に関する報告があった。ITER 標準運転プラズマへの不純物注入の影響を調べる実験 (IOS-1.2) では、ASDEX Upgrade で窒素入射のフィードバック制御によりダイバータ板の熱負荷を 5 MW/m^2 以下に低減できたと報告された。ハイブリッド運転シナリオの目標プラズマへの到達条件に関する実験 (IOS-4.1) では、JET と DIII-D で各々データベースが作成され解析が始められており、データベースの統合について検討された。

核融合による自己加熱を模擬した制御実験 (IOS-6.3) では、DIII-D と Alcator C-Mod で実験が準備されていると鈴木 (原子力機構) が報告した。

運転シナリオや加熱／電流駆動に関するモデリング活動に関しては、既存装置における ITER 模擬実験結果のモデリング／ITER における典型放電 (標準運転、ハイブリッド運転、定常運転) のモデリング／加熱装置のコード間のベンチマーク等の合計10件の共同モデリング活動を進めており、各々の活動の担当者の現状報告と計画提案を基に議論を行った。定常運転シナリオに対する電子サイクロトロン波加熱・電流駆動装置の設計変更の影響が調べられ、より広い範囲で駆動電流を高くすることができ、核融合利得 $Q > 5$ のプラズマが得られることが報告された。ブランケット試験等のための長時間放電シナリオのモデリングに関しては、標準運転で密度だけを下げた計算結果が示され、輸送モデルに依って1000秒以上の放電が得られることが示された。その他、LHD における統合輸送コードの開発とその利用について横山 (核融合研) が、トカマクとヘリカル両方に適用可能な統合コード TOTAL による ITER シミュレーションについて山崎 (名大) が報告した。

最後に、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、次回 IAEA 核融合エネルギー会議に申し込む共同論文等を取り決め、会議を終了した。尚、任期満了に伴い本グループの議長は井手氏から G.Sips 氏に交代する。

4. 「ペデスタル物理」

本会合には37名 (欧: 14, 米: 11, ITER 機構: 2, 日: 3, 中: 5, 韓: 2) の参加者があった。ペデスタル構造形成、ELM の物理とモデリング、RMP やペレットを用いた ELM 制御、LH 遷移物理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。

ペデスタル予測モデルに関しては、現在最も積極的に進められている EPED モデルを用いた ITER のペデスタル予測についての報告があった。ITER 標準運転時における周辺電子密度 $7 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ の H モードに対して、規格化周辺ベータ値が0.6、ペデスタル幅4.4 cm 程度が予測精度 $\sim 20\%$ 評価された。核融合出力はほぼ周辺ペデスタル圧力の2乗に比例することを受けて、今後ペデスタルプラズマの最適化が行われるという展望が示された。

RMP コイルを用いた ELM 熱負荷の低減化については、ASDEX Upgrade から外部コイルによる $n = 2$ のモードでの ELM 低減化についての報告があった。ペレット粒子補給によってプラズマ密度を増加させることにより、ELM 熱負荷低減化が現れる密度の閾値を超え、ピークした密度分布を維持しながら効果的に ELM が低減化された実験結果が示された。DIII-D からは $n = 2$ のモードによって低衝突周波数領域 ($\nu^* \sim 0.15$) での ELM 抑制を達成した実験結果が示された。KSTAR からは $n = 1$ のモードによって ELM を安定化させたという報告があった。RMP 印加直後に10%程度の密度低下および8%程度の蓄積エネルギー低

下が起きるが、ELM 安定化フェーズでこれらは回復するという結果が示された。また、DIII-D の RMP 印加時の三次元 MHD 平衡と真空近時平衡を比較結果が鈴木 (核融合研) から報告され、X 点付近の磁力線構造が異なることが示された。

ペレット入射による ELM 制御に関しては、ASDEX Upgrade でのペレット入射実験について報告があった。RMP 制御によって ELM が抑制されている状況でペレットを入射しても ELM をトリガーしないこと等が示された。また、Jorek コードによるペレット入射による ELM トリガーのモデリングの現状が報告され、ペレットサイズの違いによるペデスタル温度・密度分布の変化が Futatani (ITER 機構) より示された。

また、LH 遷移に関するセッションでは、ITER における運転開始後の LH 遷移の確実性に関する今後の研究課題について議論し、(1) ITER では LH 遷移に十分な加熱入力が得られるか、(2) 高密度化および高電流化に伴って高性能な H モードを維持できるか、(3) ITER で利用できる加熱入力の範囲内で $Q = 10$ に到達するための十分な閉じ込め性能が得られるか、を主要研究課題とすることで合意した。

トロイダル磁場リップルの影響に関しては、大山 (原子力機構) からテストブランケットモジュール (TBM) による局所磁場リップルの熱イオンの径方向輸送に関する報告があった。ITER 標準運転シナリオにおける熱イオンの損失量を評価し、3つの TBM ポートでの追加損失はテスト粒子の1%未満であることが示された。尚、任期満了に伴い本グループの議長は H. Wilson 氏から大山氏に交代する。

5. 「高エネルギー粒子物理」

第7回となる本会合は「第12回磁場閉じ込め系における高速粒子に関する IAEA 技術会議」の直後に開催された。参加者は約30名 (内日本より4名) で23件の報告があった。

共同実験 EP-2 の本年度のまとめが報告された。最近の結果として JET でのトルネード・モードの HAGIS コードによる再現等が報告された。EP-3 の本年度の成果として、DIII-D と ASDEX Upgrade の結果が報告された。DIII-D で $E_{\text{fast}}/T_e < 10$ 領域での強い異常輸送を高速イオン $D\alpha$ (FIDA) 計測で確認し、ASDEX Upgrade では低三角度での強い異常輸送と同時に磁場揺動の増幅を観測している。EP-4 では、MAST での NBI 駆動モードに対して閾値近傍での TAE の非線形発展が報告された。又、LHD の実験解析も計画中である。EP-5 では、DIII-D のモックアップ TBM 実験について、ASCOT, F3D-OFMC (原子力機構), DELTA5D, SPIRAL の4コードでの解析結果が報告された。ASCOT, F3D-OFMC と SPIRAL では、TBM に誘発される熱スポットへの熱負荷は良く一致した。DELTA5D は、TBM から離れた位置で、より広がった熱スポットを示した。EP-6 では、ASDEX Upgrade と DIII-D から ELM と高速イオン損失の関係、RMP 効果を示す結果が報告された。RMP による高速イオン損失評価のために F3D-OFMC, ASCOT, SPIRAL コードの改造が進行中である。

高速イオン閉じ込めと AE に関連するトピックスは次のようなものがあつた。ITER の 15MA シナリオでの ELM mitigation coil 磁場の影響を F3D-OFMC コードを用いて解析した結果が紹介され、ダイバータ領域での熱負荷の上昇値はその許容値以下に制御可能との見通しが報告された。JET からは 1997 年の DT 実験で観測されたイオン温度の異常上昇を GENE コードで再現できたと報告された。AS-COT コードは新たにジャイロ軌道追跡と NTM による磁気島の高速イオン閉じ込めへの効果の解析を可能にした。運動論的 MHD ハイブリッドコード M3D-K からは DIII-D でのビーム駆動 AE のシミュレーション結果が報告された。Bump-on-tail 不安定性に関する Berk-Breizman の拡張理論は臨界不安定性を説明できると報告があつた。JET での次の DT 実験でのアルファ粒子による AE 励起について前回の実験の解析、および、新たに利用できる LHCD の利用をもとに戦略案が報告された。

共同モデリングは AE 非線形コードのベンチマーク（トロイダルモード数 $n=6$ ）が主テーマである。HMGC コードからは $n=6$ の TAE モードと拡張版 HMGC (XHMGC) による電子フィッシュ・ボーンの解析結果が報告された。また、 $n=6$ の TAE に関して、VENUS、GYGLES、LIGKA コードの解析結果が報告され、成長率の非常に良い一致が示された。DIII-D からは、AE3D-K コードも TAEFL ジャイロ流体コードも共に他のコードとの良い一致を示した。又、RSAE に関する GTC と GYRO コードの比較も報告された。MEGA コード（核融合研）からは、高速粒子密度の依存性から線形成長率を再検討した結果、線形成長率は GYGLES コードおよび CAS3D-K コードの結果と良い一致を示すことが報告された。

ディスラプションについては、IPP から 2 次元の数値解析コードの開発状況が報告された。KSTAR からはガスバフと NBI によるディスラプション回避の放電例が示され、ITER のためのデータベース作成を計画中であることが報告された。

ITER の高速イオン計測器については、前第 6 回会合で「高磁場側協同トムソン散乱 (HFS-CTS) 計測器設置の中止に対する意見が求められている」と報告があつた。これについて、「HFS-CTS の重要性和その理由」を提言することを参加者全員で合意した。

最後に、今回は「ITPA MHD 安定性会合」および「日米 MHD ワークショップ」との合同会議として開催の予定である。

6. 「計測」

第 21 回会合が開催され、56 名が出席した（内訳／日本 2 名、中国 41 名、欧州 5 名、ロシア 1 名、米国 4 名、韓国 1 名、ITER 機構 2 名）。主な議論の内容を以下に記す。

(1) ITER の計測における最重要課題への取り組み状況について

・「損失アルファ粒子計測手法の開発」：各種計測手法の

現状と課題について報告があり、間接的な手法であるものの、プラズマ境界領域で励起されるイオンサイクロトロン波の計測やアルファ粒子の再結合分光計測の適用可能性を議論した。

・「プラズマ制御システムに関する計測要求」：新規課題として本会合より検討を開始し、まず ITER の緊急課題である逃走電子制御に関連した計測要求の検討に着手した。

・「プラズマ対向第一ミラーの寿命の評価」：ミラー表面における不純物の堆積や損耗を回避・緩和する技術の開発について議論し、今後、不純物としてベリリウムを考慮していく重要性を認識した。

・「壁からの反射光の光学計測への影響の評価」：真空容器壁で反射した ECH 波の照射による計測コンポーネントの損傷について報告があり、対策方法について議論した。

・「プラズマ立ち上げ時に必要な計測性能の評価」：今澤（原子力機構）より、ポロイダル偏光計測装置を用いた電流分布の計測について報告があり、同装置を用いてプラズマ立ち上げ時の電流分布を計測可能であることが認識された。また、ファーストプラズマ生成時の電子密度計測について議論を行い、この時期には密度干渉計はまだ設置されないものの、マイクロ波反射計や可視・真空紫外分光器（制御放射光測定）を用いてある程度は評価可能であることを確認した。

(2) 専門家ワーキンググループ (SWG) の活動について
最重要課題とも関連して、8 つの SWG の活動状況が報告された。レーザー応用 SWG の議長の M. Beurskens（代読／河野）より、遠赤外トムソン散乱に基づく偏光計測手法を ITER に適用した場合のシミュレーション結果が報告され、今後の検討の進展が期待された。

(3) 各極での ITER 計測装置の設計検討の現状について
会合の初日（17日）には、中国のプログレス会合が開催され、最新の活動状況が広範囲にわたり報告された。特に EAST, HL-2A, J-TEXT における計測開発が着実に進展していることが認識された。日本における ITER 計測装置の開発の現状については、河野（原子力機構）が報告を行った。その他、米国、韓国、ロシアおよび ITER 機構における活動について報告が行われた。

(4) 共同実験について

3 件の共同実験（第一ミラーの試験、トムソン散乱と ECE で計測した電子温度の差異、ダストモニターの試験）が進められており、これらの進展について報告があつた。2010 年より提案されている損失アルファ粒子計測用放射化プローブの試験については、実験はまだ開始されていない。また、DEMO 炉を念頭に置いた、真空容器内の磁気計測を減らした状況でのトカマク運転について、新規テーマとして検討することとなった。本グループの議長は R. Boivin 氏から H. Park 氏に交代する予定である。