



インフォメーション

■ITPA (国際トカマク物理活動) 会合報告(45)

●分野: 「MHD 安定性」¹, 「高エネルギー粒子物理」², 「統合運転シナリオ」³, 「輸送と閉じ込め物理」⁴, 「ペDESTAL物理」⁵

●開催日: 2014年3月10日-14日¹, 2014年3月31日-4月3日^{2,3}, 2014年4月9日-11日⁴, 2014年4月15日-17日⁵

●場所: 土岐(日本)¹, マドリッド(スペイン)², ケンブリッジ(米国)^{3,4}, プラハ(チェコ)⁵

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(鳥取大)¹, 政宗貞男(京都工繊大)¹, 松永剛(原子力機構)¹, 渡邊清政(核融合研)¹, 山崎耕造(名大)¹, 篠原孝司(原子力機構)², 東井和夫(核融合研)², 藤堂泰(核融合研)², 長壁正樹(核融合研)², Andreas Bierwage(原子力機構)², 村上定義(京大)², 山本聡(京大)², 林伸彦(原子力機構)³, 井手俊介(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, 鈴木隆博(原子力機構)³, 本多充(原子力機構)⁴, 田中謙治(核融合研)⁴, 吉田麻衣子(原子力機構)⁴, 田村直樹(核融合研)⁴, 井戸毅(核融合研)⁴, 坂本宜照(原子力機構)⁴, 宮戸直亮(原子力機構)⁴, 相羽信行(原子力機構)⁵, 神谷健作(原子力機構)⁵, 浦野創(原子力機構)⁵, 森崎友宏(核融合研)⁵, 鈴木康浩(核融合研)⁵, 中嶋洋輔(筑波大)⁵

(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	2014年10月20-22日	サンクトペテルブルク(ロシア)
統合運転シナリオ	2014年10月20-23日	
輸送と閉じ込め物理	2014年10月20-22日	サンクトペテルブルク(ロシア)もしくはサン・ポール・レ・デュランス(フランス)
ペDESTAL物理		
高エネルギー粒子物理		

1. 「MHD 安定性」

第23回(改組後第12回)となる本会合は, 日米MHDワークショップと合同で開催され, 日本29名, 米国11名, 欧州9名, ロシア2名, 韓国2名, 中国4名, インド2名, ITER機構2名が参加した(人数は概数でTV会議参加を含む)。会合では, ディスラプションや誤差磁場(3次元磁場効果含む)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, 逃走電子に関しDIII-Dから, (1)硬X線, 軟X線, 電子サイクロトロン放射など, 複数の計測装置による逃走電子の観測, (2)赤道面強磁場側に局在したシンクロトロン放射の観測に関する結果が報告

された。また, 原子力機構から, 共鳴磁場摂動(RMP)印加時の逃走電子の損失に関するETC-Relコード解析の結果が報告された。また, ディスラプション時の電流減衰に関し, JT-60Uの実験とDINAコードとの比較結果が報告された。

誤差磁場に関連して, 最も安定限界に近いキンクモードのパターンと共鳴する成分を補正することが重要であることがDIII-Dから示された。また, 外部磁場により $m/n=2/1$ の新古典テアリングモード(NTM)を強制的に回転することでモードロックによるディスラプションを回避した実験結果が紹介された(m はポロイダルモード数, n はトロイダルモード数)。原子力機構からは, トロイダル非圧縮性抵抗性MHD方程式を用いた非線形MHDコードによる外部磁場効果のシミュレーション結果が示された。回転磁気島が静的外部磁場によってロックし, その外部磁場閾値が磁気レイノルズ数でスケールリングできることが示された。KSTARから, ロックモード/ディスラプションへの複数モード数誤差磁場補正の影響, および磁場摂動によるELM抑制時のフィラメント構造形成について報告があった。また, 国際共同実験およびワーキンググループ活動の結果として, ロックモード制御実験, 誤差磁場浸み込み閾値とプラズマ回転効果に関する実験, $n=2$ 誤差磁場補正に関する研究の報告があった。

ヘリカルプラズマにおけるRMPの浸み込み研究では, 浸み込み磁場強度の磁場配位依存性が顕著に観測され, 特に, メルシエパラメータとの相関が高いことがLHDにおける異なる磁場配位制御実験結果から示された。また, LHDにおけるELM研究では, RMPによりELMの頻度を5倍に増やし, 大きさを半分程度に減少できることが示された。

トカマクの3次元効果を解明するための環境整備として, ステラレータ/ヘリオトロン研究で培われたMHD平衡・安定性の解析ツールの利用法の実例や今後の展望についての紹介があった。特に, 3次元のMHD平衡の同定手法の重要性が指摘されており, 逆磁場ピンチ(RFP)のヘリカル対称モードでは, その平衡同定の試みが紹介された。RFPのヘリカル対称モードに関して, Hartman数が大きいほど遷移が起りやすいことが実験的に示されるとともに, その発現条件の定量的な説明が可能なレベルに理論研究が進んでいることが紹介された。

このほかNTMに関して, 回転速度(または回転速度シア)とNTM発生時ベータ値との関係に関するDIII-D, ASDEX Upgrade, NSTXの実験結果のレビュー, およびプラズマ回転とNTM安定性に関するCUTIEコード解析の進展が報告された。

2. 「高エネルギー粒子物理」

本会合は第12回となり、参加者は約30名、32件の発表があった。

はじめに、ITER 機構の Pinches 氏より、ITER の進捗状況の説明と高エネルギー粒子物理に関わる課題が示され、再認識された。加えて、Pinches氏が取りまとめを行っている統合モデリング活動が説明された。

共同実験では、アルヴェン固有 (AE) モードの非線形時間発展を扱う共同実験 EP4 については、非線形発展のキーパラメータであるアルヴェンエネルギーとイオンドラッグエネルギーを考慮した一連の実験データが参加した装置からひと通り提供された。今後は活動が解釈のためのモデリング活動となると考え、これまでの実験活動の成果を取りまとめ、共同実験としては終了することとした。テストブランケットモジュールモックアップ磁場による高速イオン閉じ込め評価を行う EP5 は、5 月半ばに実施する新規の実験についての説明があった。今回は MHD とモックアップ磁場の相乗効果に着目した実験を実施する旨発表され、実験の進め方について議論を行った。EP6 で扱っている ELM 制御コイル磁場擾乱中の高速イオン閉じ込めについては、それぞれの装置においてモデル磁場を評価するコードの開発が進み、それを使った高速イオン閉じ込め評価が開始された。ITER における ELM コイル磁場擾乱中の高速イオン閉じ込め劣化とそれによる装置の損傷が懸念されているが、これまでは、プラズマの応答を考慮しない磁場で計算した計算結果による懸念であり、プラズマ応答を考慮すると影響は小さいという意見があった。今回、ELM コイル磁場擾乱については、DIII-D のグループから、実験で ELM 低減が観測されているケースにて実施したプラズマ応答を考慮したモデル磁場に基づく高速イオン損失計算が報告された。2 つの主要なコードによって計算されたモデル磁場であるが、いずれの場合も真空磁場のときよりも損失イオンプローブの計測器位置での損失量が増加していることが報告された。原子力機構の OFMC コードを用いた KSTAR, ASDEX Upgrade, DIII-D での活動も報告された。ECH による AE の制御に絡む EP7 について今年 DIII-D と ASDEX Upgrade で実施予定の実験についての紹介と議論が行われた。

実験では NSTX より高高調波速波 (HHFW) 印加によるアルヴェン固有モード低減の報告があった。上記 ECH 同様 AE の制御の手段として高いレベルの興味を引いた。

線形コードのベンチマーク活動は、 $n=6$ ベンチマークケース、ITER の 15MA シナリオの安定性解析、JET DT 実験のシナリオ作成を指向した安定性解析を実施しているが、これらの現状のレビューと進め方について議論した。

JET DT 実験のベンチマークについては中性粒子ビームの情報が追加された。

非線形コードのベンチマーク活動では、不安定性飽和過程における高速粒子位相空間解析の報告が Briguglio 氏よりあった。また、Venus コードで発生している不安定性飽和強度に関わる問題点が報告された。

これまで、高速イオン源として中性粒子ビームと DT

核融合反応生成物のアルファ粒子のみを扱ってきたが、イオンサイクロトロン高周波 (ICRF) が作り出す高速イオンも定量的に扱う必要がある。これまで ICRF の専門家が主要な参加者に含まれていなかったため、今回、特化したセッションを設け、積極的に招待し、レビュー発表と議論が実施された。今回をキックオフとし、協力して ICRF による高速イオンに関わる物理に取り込むこととした。

3. 「統合運転シナリオ」

第12回の本会合には、日本 2 名、欧州 10 名、米国 12 名、韓国 2 名、中国 1 名、ITER 機構 2 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/プラズマ回転駆動、プラズマ制御に関するモデリング活動の現状の報告と今後の活動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。

ITER 機構からは、ITER 計画の進展、必要な検討事項等に関して報告があった。統合運転シナリオに関わる事項として、He プラズマの運転シナリオや、タングステン炉心への流入量とプラズマ電流立ち下げ時のプラズマ密度減衰のモデリング、タングステン蓄積による炉心プラズマの熱消失の時間スケール等のプラズマ制御への擾乱の特性、プラズマの電流立ち下げと安全な停止の実験/モデリング等に関する調査・検討を要請された。その中で特にプラズマの安全な停止の検討状況に関して報告があった。制御できるパラメータと関わる物理等の関係性、ダイバート状態どこまで制御できるか、ELM がなくなるとタングステンが蓄積する怖れがあることから H-L 遷移をどの時点にするか等の検討項目を整理し、リスク調査の必要性を議論した。

国際比較実験を含めた各装置の実験の現状と今後の実験予定に関して報告があった。ITER におけるプラズマの安全な停止シナリオを検討するため、グループでは今後、各実験装置でのプラズマの停止方法やその時のプラズマの挙動についてデータを収集することになった。JT-60 のデータも要請されたため、井手 (原子力機構) が対応することとした。また、建設中の装置として JT-60SA と WEST の報告があった。JT-60SA に関しては、欧州は EFDA から改組された EUROfusion の対応、日欧で行っているモデリング活動について報告された。WEST に関しては、運転シナリオが提示され、アクチュエータやシナリオのシミュレーション結果が示された。

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。ペDESTアルの圧力と幅の評価のために EPED モデルの予測結果のテーブル化、新しい輸送モデルである MMM7.1 と TGLF の実験データとの比較検証、グループの共同作業として行

う粒子輸送モデリング等の報告があった。その中で、林（原子力機構）は、特に JT-60SA プラズマ予測のために欧州と共同で行っている JT-60U と JET の実験データを用いたモデルの検証結果について報告した。炉心の熱輸送モデルに関しては、標準的な H モードプラズマでは、電流拡散バルーニングモード (CDBM) モデルとボーム・ジャイロボームモデルでおおよその温度を予測でき、ドリフト波乱流モデル GLF23 でより正確な温度を予測できる一方、ハイブリッドプラズマでは、GLF23 より CDBM の予測の信頼性が高いこと等を示した。

この他、今年度の IAEA 核融合エネルギー会議で発表する論文内容を議論し、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。

4. 「輸送と閉じ込め物理」

3 日間にわたった本会合 (第12回) は、39名 (日本 2 名、欧州13名、米国20名、韓国 1 名、中国 1 名、ITER 機構 2 名、リモート (欧) 4 名) が出席した。会合は 9 つのセッションから構成され、ITER における輸送関連計測、回転、I モード (温度にのみペDESTAL が形成されるモード)、分布硬さ、3 次元効果、L モードにおける shortfall (不足; 周辺部においてジャイロ運動論コードが予測する乱流揺動が実験のそれより低い現象)、分科会セッション、燃料供給と粒子輸送、熱輸送において、報告及び議論がなされた。

仏規制当局による ITER の DD 実験許可のためには 2 年間の非放射化運転期が必要となり、その間に解決しなくてはならない課題が冒頭に紹介された。それらは主に、He プラズマの H モード遷移パワー、コアにおけるタングステン蓄積制御、金属壁と高い性能を持つ H モードとの共存性などである。

輸送に関連する計測のセッションは初めてであり、ITER における燃焼物理解析や加熱・制御のために必要な計測装置や、燃焼プラズマ下におけるジャイロ運動論コードの妥当性検証方法などについて議論がなされた。特に分布計測や揺動計測の重要性が指摘され、ITPA 計測トピカルグループとの議論を深めるべきとの提案がなされた。

回転のセッションでは、まず運動量輸送と自発回転に関する共同実験の成果が発表された。ポロイダル・トロイダル自発回転分布に関する、補間データ・分布ではなく妥当性が吟味された計測関連の詳細データも含む回転測定値のデータベースの作成状況が報告された。また、自発回転のスケーリングを作成するために、母集団から大きく逸脱した計測値を自動的に排除してくれる測地線最小二乗法 (GLS) という新しい手法が紹介された。

I モードのセッションでは、Alcator C-Mod の結果からのスケーリングを元に、ITER においても I モードは可能で有益な面が多いとの報告があった。

3 次元磁場のセッションでは、RMP に関連した輸送の評価が LHD, ASDEX Upgrade, DIII-D, NSTX より、また、磁場の三次元化の不純物輸送への影響が TJ-II から、新古典トロイダル粘性の理論計算と実験との比較が JT-60U

より報告された。また、W7-X の輸送研究についてのレビューも行われた。LHD では RMP 印加時の粒子輸送の増大は乱流揺動の変化よりは磁場トポロジーの変化による可能性が大きいこと、DIII-D の H モードでは乱流揺動の変化が粒子閉じ込めの劣化の原因であることが示された。ASDEX Upgrade では密度の吐き出しから増大への変化が印加磁場に対して閾値をもつことが報告された。

L モードの shortfall については、ジャイロ流体準線形コードである TGLF は評価手法がジャイロ運動論コードと質的に異なることから、比較検討対象からは外すべきとの指摘から入った。GYRO コードはベンチマーク対象となっている DIII-D 放電で大きく shortfall を起こしている一方、GENE コードは計測誤差の範囲内における入力調整で shortfall はおおむね解消されている。また同放電において GYRO, GENE, GKW, GS2 の各コードが一致した結果を出すのは電子温度勾配がゼロでかつ ExB シア効果を入れない場合のみであるとの衝撃的な結果が示された。これらの結果を基に、2 番目に優勢な TEM の影響を含めることと、ExB シア実装の共通化が今後のベンチマーク活動の方向として示された。

粒子輸送と熱輸送のセッションでは、TGLF や QuaLiKiz といった先進的な輸送モデルと輸送コードを用いた解析・予測シミュレーションの結果が複数報告された。大域的ジャイロ運動論コード GYSELA に渦度のソースを ad hoc に入れることで温度の異方性が生じ、その結果準周期的な内部輸送障壁の形成と崩壊を再現できたという計算結果が示された。

5. 「ペDESTAL 物理」

本会合には 33 名 (欧州15名、米国12名、日本 3 名、中国 2 名、韓国 1 名、インド 1 名、ITER 機構 1 名、リモート参加を含む) の参加者がおり、ITER の最重要課題である (1) RMP コイルを用いた ELM 低減化条件、(2) H モードペDESTAL 構造の理解、(3) L-H および H-L 遷移の発生条件、(4) ペレット入射による ELM 制御条件の各ワーキンググループの現状報告に関して討議が行われた。昨年11月の ITPA 調整委員会での決定を受けて、Maingi (PPPL) が議長に、浦野 (原子力機構) が副議長に就任したことが報告された。

RMP コイルを用いた ELM 低減化については、KSTAR から外部コイルによる $n=1$ ないし $n=2$ のモードでの ELM 低減化・抑制についての報告があった。ELM が低減化される場合には RMP 印加直後に低減化されるが、ELM が抑制される場合には RMP 印加と ELM 抑制のタイミングにずれが生じ、また温度が ELM 発生に至らない程度の値で細かな振動をしながら飽和していることから、Bursty H モードという新たな放電モードとして認識されうると報告された。JET からは、 $n=1$ のモードでの磁場印加により、ペDESTAL でのエネルギー閉じ込め性能は 20% ほど劣化するが、その原因は密度が低下したためであり温度はほとんど変化がないかあるいは増加するとの報告があった。MAST からは、RMP によるコア領域の閉じ込め性能劣化

を抑えるために、その主な原因である粒子閉じ込め性能劣化をガス入射率の調整によって抑えることに成功し、その結果 RMP 印加前後ではほぼ同じペデスタル圧力を保ちつつ ELM を低減することに成功したという報告があった。そのほかにも様々な装置での実験結果や数値シミュレーション結果の報告などがあったが、いまだに RMP 印加による ELM 低減化・抑制に必要な条件の定量化ができておらず、これを達成することを最優先にしてほしいという ITER 機構からの要請があった。

ペデスタル構造の理解に関しては、金属壁を持つ JET 装置においては、従来の ELM 安定性解析では考慮していなかった短波長の MHD モードの安定性が ELM 発生条件を決定している可能性があることが相羽（原子力機構）から報告された。また、ペデスタル予測モデルに基づいてペデスタル密度の最適化を行うことで、従来の type-I ELM プラズマよりも高いペデスタル性能を持ちつつ ELM が抑制された放電（QH モード）が実現するという理論予測の報告があった。さらに、神谷（原子力機構）からは、JT-60U H モードプラズマのセパトトリクスにおけるプラズマ回転計測に関する報告があり、ELM の発生によってセパトトリクスでの回転は大きな影響は受けないと考えられるが、計測方法の時間分解能の制限もあるため理論モデルとの比較などを含めて引き続き検討を進めるなどの議論があった。

L-H 遷移に関しては、遷移パワーの密度依存性に関する理解が不十分であり、高密度である ITER における遷移パ

ワーを予測するにはさらなる理解が必要であること、また同じく遷移パワーに対する金属壁の影響について JET における実験結果が示され、炭素壁の場合と比べて遷移パワーが下がっていることが報告された。

ペレット入射による ELM 制御に関しては、JET 装置において炭素壁では容易に制御できていたが金属壁に置き換えた後は難しくなっていること、またこの原因は现阶段でははっきりしておらず比較実験などを通して詳細な解析が必要なことが報告された。

今回は、ワーキンググループ内に限らず、金属壁や不純物がペデスタル性能や ELM に与える影響について精力的な議論があった。JT-60U では不純物としてアルゴンを入射することで、プラズマ密度が高い場合には閉じ込め性能が改善されることやコア領域の密度が増大することなどが浦野（原子力機構）から報告された。また、炭素壁を持つプラズマでは“三角度を大きくすることによってペデスタル閉じ込め性能が改善される”、“ELM の発生条件が MHD 安定性解析とよく一致する”という傾向があったが、金属壁を持つプラズマでは“三角度による閉じ込め性能改善が見られない”、“MHD 安定性解析で安定であっても ELM が発生する”などの報告がされ、いずれも金属壁導入後の高密度放電において MHD 安定性が変化したことが原因の可能性があり、今回、相羽によって報告された短波長モードの重要性については引き続き検討すべきという議論があった。