



■ITPA (国際トカマク物理活動) 会合報告(26)

- 分野: 「輸送と閉じ込め物理」¹, 「統合運転シナリオ」², 「ペDESTAL物理」³, 「計測」⁴, 「MHD安定性」⁵, 「高エネルギー粒子物理」⁶, 「スクレイプオフ層およびダイバータ物理」⁷
- 開催日: 2009年3月31日～4月2日¹, 2009年3月31日～4月3日², 2009年4月20日～22日³, 2009年4月20日～4月24日⁴, 2009年4月21日～24日^{5,6}, 2009年5月5日～8日⁷
- 場所: 那珂(日本)^{1,2}, カダラッシュ(フランス)³, サンクトペテルブルク(ロシア)⁴, 大田(韓国)^{5,6}, アムステルダム(オランダ)⁷
- 担当委員: 井戸村泰宏(原子力機構)¹, 坂本宜照(原子力機構)¹, 田中謙治(核融合研)¹, 田村直樹(核融合研)¹, 林伸彦(原子力機構)¹, 矢木雅敏(九大)¹, 吉田麻衣子(原子力機構)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, 福山淳(京大)², 相羽信行(原子力機構)³, 浦野創(原子力機構)³, 大山直幸(原子力機構)³, 神谷健作(原子力機構)³, 北島純男(東北大)³, 中嶋洋輔(筑波大)³, 森崎友宏(核融合研)³, 伊丹 潔(原子力機構)⁴, 河野康則(原子力機構)⁴, 川端一男(核融合研)⁴, 草間義紀(原子力機構)⁴, 笹尾真実子(東北大)⁴, ピーターソン・バイロン(核融合研)⁴, 間瀬 淳(九大)⁴, 諫山明彦(原子力機構)⁵, 榊原悟(核融合研)⁵, 古川勝(東大)⁵, 松永剛(原子力機構)⁵, 山崎耕造(名大)⁵, 渡邊清政(核融合研)⁵, 長壁正樹(核融合研)⁶, 篠原孝司(原子力機構)⁶, 東井和夫(核融合研)⁶, 藤堂泰(核融合研)⁶, 濱松清隆(原子力機構)⁶, 村上定義(京大)⁶, 山本聡(京大)⁶, 朝倉伸幸(原子力機構)⁷, 芦川直子(核融合研)⁷, 上田良夫(阪大)⁷, 大野哲靖(名大)⁷, 田辺哲朗(九大)⁷, 仲野友英(原子力機構)⁷, 増崎貴(核融合研)⁷(下線は当該グループの会合への出席者を示す)

2009年の春季に、ITPAに関する上記7つの会合が開催された。日本側委員の参加者は28名であった。

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
輸送と閉じ込め物理	2009年10月5-7日	プリンストン(米)
統合運転シナリオ	2009年10月20-23日	フランスカティ(伊)
ペDESTAL物理	2009年10月5-7日	プリンストン(米)
計測	2009年10月12-16日	浦項(韓)
MHD安定性	2009年10月6-9日	カラム(英)
高エネルギー粒子物理	2009年9月24-25日	キエフ(ウクライナ)
スクレイプオフ層およびダイバータ物理	2009年12月14-17日	サンディエゴ(米)

1. 「輸送と閉じ込め物理」

本会合(第2回)には、43名(日:12, 欧:12, 米:11, 露:4, ITER機構:2, 中:2)の参加者がおり、「統合運転シナリオ」トピカル・グループとの合同セッションを行い、L-H遷移と輸送モデリング、回転の閉じ込めへの影響、運動量輸送、電子輸送、等について発表・議論が行われた。L-H遷移と輸送モデリングのセッションでは、様々な輸送モデルを用いたベンチマークの結果が報告された。ITERでの電流ランプアップ・ランプダウン時の電流分布の予測には、プラズマの外側($r/a > 0.5$)の電子温度が重要であることが明示された。回転の閉じ込めへの影響のセッションでは、竹永(原子力機構)がセッションの編成と座長を担当し、JT-60U, TCV, NSTX, DIII-D, ASDEX-U, C-Modから研究結果が報告された。DIII-DとC-Modでは、 $E \times B$ シアが減少すると輸送が劣化するとの報告があった。竹永(原子力機構)は、JT-60Uでは、弱磁気シアプラズマでは $E \times B$ シアよりも回転の方向が閉じ込めに重要であり、負磁気シアプラズマでは回転のシアが重要であることを報告した。ASDEX-Uでは、電子温度(T_e)とイオン温度(T_i)の比が $E \times B$ シアよりも閉じ込めに対して重要であると報告された。運動量輸送のセッションでは、JT-60U, DIII-D, JET, C-Mod, LHDから、運動量輸送や自発回転等に関する実験結果について報告された。JT-60Uでは、運動量輸送の拡散係数とピンチとの比や運動量輸送係数と熱輸送係数との比が、電子密度やイオン温度に関係すると吉田(原子力機構)が報告した。DIII-Dからは、自発回転を発生させるトルクが存在が報告された。LHDでは、非対角項の径電場による運動量束の発生について居田(核融合研)が報告した。理論からは、乱流に起因する運動量輸送のピンチや自発回転の物理機構について報告があった。また、運動量輸送のデータベース活動の開始や装置間比較実験に関する議論が行われた。電子輸送のセッションでは、実験から7件、理論から2件の報告があった。捕捉電子モード(TEM)が支配的になる領域($T_e > T_i$)では、DIII-Dにおいて、乱流の性質の変化は限界温度勾配が存在する位置と相関しており、非線形ジャイロ運動論シミュレーションによる予測と矛盾しないとの報告があった。また、イオン温度勾配(ITG)モードが電子輸送に影響する結果についても報告があり、C-ModやASDEX-Uでは、高密度プラズマにおいてITGモードが電子輸送を支配している結果が示された。NSTXでは、ITGモードが回転シアによって大きく減少するとの報告があった。田中(核融合研)が、LHDにおける電子加熱下での乱流揺動の応答について報告した。負イオン源NBIによる電子加熱を増加するとプラズマコア部の密度の吐き出しが観測され、乱流揺動が増加することが観測された。これはトカマクによるECH印加時に観測される密度の吐き出しと類似した現象であ

る。観測された揺動はプラズマ上で電子の反磁性方向に進行している可能性が高い。井戸村（原子力機構）からは ETG 乱流について報告があり、弱磁気シアプラズマでは、ゾーナルフローがストリーマや輸送を抑制させる結果が報告された。

2. 「統合運転シナリオ」

本会合（第2回）には40名（日：11，欧：11，米：9，ITER 機構：4，露：3，韓：2）が参加し、主に(1)国際装置間比較実験の進展の報告と新たな計画の立案，(2)ITER 運転シナリオ開発とモデル化，(3)加熱・電流駆動等の制御機器・手法に関する実験とモデリングについて議論を行った。また初日には「輸送と閉じ込め物理」トピカル・グループとの合同セッションを開催し，(4)ITER における L-H 遷移および電流立ち上げと立ち下げシナリオについて議論を行った。以下に概略を示す。

(1) 標準運転シナリオ (IOS-1.1) に関しては，DIII-D でデモンストレーション放電を行ったところ，ランプダウン中にディスラプションが頻発し $n=1$ テアリングモードの安定性境界に近いことが懸念されるとの報告があった。EC を用いた着火アシスト (IOS-2.1) に関しては，QUEST からヌル点がない着火磁場配位に EC を入射することで電流立ち上げが効率よく行えるとの報告があり，同様の報告が DIII-D および KSTAR からなされた。ITER 定常運転シナリオ (IOS-3.2) および ITER ハイブリッド運転シナリオ (IOS-4.1) に関しては，JET から加熱初期にプラズマ電流のランプダウンを行うことで高い閉じ込め ($H_{H98(y,2)} > 1.2$) で高 $\beta_N > 3$ を達成できたとの報告があった。NB 電流駆動 (IOS-5.1) については JT-60U および DIII-D から解析結果の進展の報告があった。JT-60U からは電流駆動位置，プラズマ形状や加熱パワー等をスキャンして NB 駆動電流分布を測定した際に，電流分布の変化から評価した NBCD 位置はいずれのスキャンでも計算結果と概ね一致すると報告があった。DIII-D からは高速イオンの輸送を NB 駆動電流の計算で考慮することにより NB 周辺電流駆動の実験結果を良く再現できることが報告された。

(2) 1.5次元輸送コード TOPICS-IB コードにおいて TASK コードの IC モジュール (TASK/WM) の組み込みが進行中であり，IC，EC，NB を用いた ITER ハイブリッドシナリオの解析結果および，さらに LH を追加した定常運転シナリオについても報告があった。特に EC や LH ではプラズマ境界の形状が重要であり，コード間のベンチマークでは平衡をそろえる必要性が提案された。

(3) TASK コードを用いた多粒子種での EC，LH，IC，NB，アルファ加熱による自己無撞着な加熱・電流駆動シミュレーションの結果が紹介された。また ACCOME コードを用いた ITER 運転シナリオ 4 のシミュレーションの報告があり，NB 中心および周辺電流駆動の組み合わせにより $q(0) > 2$ のシナリオは可能であるがさらに LHCD を用いることで磁気シアの反転位置を制御できるとの報告があった。実験では，上記の国際装置間比較実験 IOS-5.1 に関する発表があった。

(4) TASK コードを用いた電流拡散性バルーニングモード (CDBM) モデルでの ITER プラズマの立ち上げシミュレーションが報告された。CDBM モデルの磁気シア依存性のため放電初期の加熱タイミングを調整することで ITB を形成することにより標準運転とハイブリッド運転に適したシナリオが得られることが報告された。また，TSC コードによる ITER プラズマの立ち下げシミュレーションでは，H モードから L モードへの逆遷移後に EC を入射し密度を低下させることで放射コラプスを回避して安定に立ち下げを行えることが報告された。

3. 「ペDESTAL物理」

本会合には32名（欧：13，米：8，ITER 機構：7，日：2，中：2）の参加者があり，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)ペレット入射による ELM 制御条件，(3)ペDESTAL特性に対するトロイダル磁場リップルの影響，(4)H モードペDESTAL構造予測モデルのベンチマークの各ワーキンググループの現状報告と国際装置間比較実験による研究成果に関する討議が行われた。

RMP コイルを用いた ELM 低減化については，DIII-D や ITER に類似したコイルを持つ MAST から，DIII-D と同程度の磁気島の重なりが得られる磁場を加えても ELM を安定化することはできなかったとの報告があった。他装置でも RMP コイルの設置が進められており，ELM 安定化条件の定量化が期待されている。

ITER ではペレット入射による ELM 制御が検討されており，各装置の新しいペレット入射装置の稼働および ELM 制御の結果報告が期待されている。JET において燃料供給用ペレット (10Hz) を用いて ELM 制御に成功したこと，ASDEX Upgrade や DIII-D のペレット入射装置の開発状況について報告があった。

トロイダル磁場リップルの影響に関しては，新たに L-H 遷移閾値パワーへの影響を調べることで合意するとともに，これまでの L-H 遷移実験に関するデータベースでは各装置固有のリップルの大きさとスケーリングからのずれに相関がないこと，JET のリップルスキャン実験では 0.08%~1.1%の間で閾値パワーに違いはないことが大山（原子力機構）から報告された。また，ITER のテストブランケットモジュール (TBM) に使用される磁性体による局所リップルの影響について浦野（原子力機構）から報告があった。フェライト鋼設置後の JT-60U の磁場構造はトロイダル対称性が失われており，TBM が作り出す局所リップルと似ていること，その場合でもトロイダル回転がゼロもしくはプラズマ電流と同方向である場合であれば $H_{H98(y,2)} \sim 1$ の閉じ込め性能が得られていることが示された。

ペDESTAL予測モデルに関しては，ペDESTAL幅はペDESTAL部のポロイダルベータ値の平方根に比例することが多くの装置で観測されていること，実験結果に基づきパラメータを決めた EPED 1 モデルは， $7 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ の密度に対し 4.6 keV というペDESTAL性能を予測することが報告された。

4. 「計測」

本会合（第16回）には、70名（露：28，欧：21，日：7，ITER 機構：5，米：4，中：1，印：4）が出席し、最優先課題（HP）、各極の研究開発の状況、専門家ワーキンググループ（SWG）の再編等について発表・議論を行った。以下、日本からの報告を中心に記す。

「HP：損失アルファ粒子計測」については、ITERに適用可能な計測手法は未だ確立されておらず、その開発が奨励されている状況である。笹尾（東北大）は、ITERの誘導運転および非誘導運転でのアルファ粒子軌道を計算し、アルファ粒子の軌道にあって、検出器への進入の障害となる箇所第一壁の形状を後退させることを提案した。A.アレクセイエフ（露）およびE.ドラピコ（核融合研）は、イメージングボロメータを用いたマルチフィルタ熱検出手法の開発状況を報告した。

「HP：較正手法および較正源の評価」について、笹尾（東北大）は、中性子計測装置の較正のために較正中中性子源を稼働させる期間は、DT 運転用データ取得に約1週間及びDD 運転用に約1ヶ月との評価結果を報告した。草間（原子力機構）は、中性子計測の精度向上に向けた中性子輸送解析を行い、マイクロフィッションチェンバーの場合、冷却水の存在で中性子スペクトルが低エネルギー領域で変化し、中性子計数率が約40%上昇すること、影響低減のためカドミウムのコーティングを検討中であることを報告した。

その他、「HP：第一ミラー」および「HP：高温ダスト計測」について議論を行った。前回会合で追加した「HP：壁からの反射光の影響」および「HP：プラズマ立ち上げ時に必要な計測性能」については、次回会合で議論する予定とした。

「反射計 SWG の活動」に関して、間瀬（九大）は、新型ノッチフィルタ（84, 140, 170 GHz）の開発の状況を報告した。また、ITER プラズマでは、相対論効果により反射計や干渉計で得られる密度分布誤差が大きくなるため、相対論効果を取り入れた解析が重要になることを指摘した。

「日本における研究開発」について、河野（原子力機構）は、日本が調達予定の ITER 計測装置の設計検討の進展として、周辺トムソン散乱用 YAG レーザー増幅器のプロトタイプの開発に成功し、YAG レーザーの性能達成に見通しを得たこと、ポロイダル偏光計の上部ポートプラグ内機器配置の検討および真空容器内の再帰反射ミラーの設計検討を進めたこと等を報告した。伊丹（原子力機構）は、JT-60SA の計測装置の設計検討の現状について、3つのカテゴリ（トカマク装置保護および運転、基本パラメータ計測、物理理解）に計測器を分類することを示し、代表的な計測器のCAD図およびポート配置案を報告した。川端（核融合研）は、波長 50 μm 帯の2波長同時発振型テラヘルツレーザーを光源とする計測器の開発について、干渉計測において良好な振動補正特性を得たこと、偏光計測における波長分離用ファブリペロー干渉フィルタを製作し良好な較正データを得たこと等を報告した。

SWGについては、以下の8つに再編することとなっ

た；中性子計測／第一ミラー／放射線照射効果／能動的分光／受動的分光／マイクロ波計測／レーザー応用計測／第一壁計測（新設）。今後、各SWGへの参加メンバーおよび議長／副議長の選出を進める予定である。

5. 「MHD 安定性」

改組後第2回（通算では第14回）となる本会合は、韓国・大田の国立核融合研究所（NFRRI）で開催された。出席者は日本、米国、EU、ロシア、韓国、インドから約30名であった。主な議題は、ディスラプション、プラズマ制御、新古典テアリングモード（NTM）、抵抗性壁モード（RWM）に関する研究結果、および国際共同実験の報告・検討であった。また、会合の一部は高エネルギー粒子トピカルグループと合同で行われた。

ITERの具体的な運転計画が審議されていることもあり、今回の会合ではディスラプションおよびこれに関連するトピックス（ハロー電流、真空容器への電磁力、逃走電子、垂直不安定性など）に多くの時間が割り当てられた。ハロー電流に関しては、これまで解析してきたピーク値以外に、時間発展を解析した例がASDEX-UやJETから報告された。NSTXからは、ダイバータ外足部のタイルに新たに設置したハロー電流測定センサの結果に関する報告があった。また、ハロー電流割合とトロイダルビーキングファクタとの積はITERでの上限値（0.75）の1/10程度であるとの報告があった。DIII-Dからは、ディスラプション時の真空容器の変位を測定するための加速度計を真空容器下部に設置した結果が報告された。当初予定していたデータが電磁力の影響により得られなかったため今後別の測定装置を導入して再度測定するとの報告があった。また、TEXTORからはディスラプション発生時の制御に関して、干渉計データを使った位置制御および共鳴磁場摂動（RMP）コイルによる逃走電子緩和に関する結果が報告された。JT-60Uからは密度限界ディスラプション時の電流減衰時間に関する発表が柴田（名大）よりあり、インダクタンスの時間変化を考慮することの重要性が示された。また、JT-60Uのハロー電流の時間発展に関するDINAコードシミュレーションの結果に関する報告もあった。

RWMに関しては、RWM安定性のセンシティブティ研究の報告があった。KINX-RWMコードによると真空容器の水平面外側の3次元形状を変えた場合でも成長率 γ は概ね $4\tau_w C_\beta (1 - C_\beta)$ と表されるとの結果が報告された（ τ_w は壁の時定数、 $C_\beta = (\beta_N - \beta_N^{\text{no-wall}}) / (\beta_N^{\text{ideal-wall}} - \beta_N^{\text{no-wall}})$ 、 β_N は規格化ベータ値、 $\beta_N^{\text{no-wall}}$ は壁なしベータ限界、 $\beta_N^{\text{ideal-wall}}$ は理想壁ありベータ限界）。また、MISKコードによると高速イオン密度の上昇とともにRWM安定性が改善されるとの結果が報告された。

NTMに関しては、KSTARにおけるNTMの予測計算として、異なった磁場配位における吸収位置およびECCD分布の結果が報告された。

装置間比較研究に関しては、それぞれのトピックスにおける進捗状況の報告があった。

6. 「高エネルギー粒子物理」

第2回となる本会合の参加者は22名（欧：9，日：6，米：2，韓：2，ITER機構：2，露：1）であった。最初にITER機構より、ITER計画の更新を反映した一貫性のあるデータベース構築の計画が報告された。このデータベースはトロイダル磁場リップルと強磁性体製のテスト・ブランケット・モジュール（TBM）によって誘起される擾乱磁場による高速イオンの壁損失を予測する上で重要であることを本会合は確認した。ITERにおけるトロイダル磁場リップルに起因する高速イオン損失評価に関しては、ドリフト軌道を追跡する原子力機構のF3DOFMCコードとEUのASCOTコードの間でのベンチマーク・テスト結果の報告と議論が行われた。リップル低減フェライト鋼とTBMによって誘起される擾乱磁場は原子力機構のFEMAGコードで作成したデータを用い、3次元の壁配位を用いて壁への熱負荷等を比較した。結果はコード間での微妙な差異があり、今後の検討課題とした。前回会合でのPPPLからの報告でTBMの擾乱磁場中での旋回軌道追跡による高速イオンの損失量がドリフト軌道追跡による損失量を大きく上まわるとあった。しかし、再計算の結果として旋回軌道追跡による解析結果はドリフト軌道追跡による解析結果と矛盾がないとの訂正が報告され、今後もTBMによる擾乱磁場が高速イオン損失に悪影響を与える可能性についての検討を継続することとなった。プラズマ平衡におけるリップル磁場の影響を評価するためVMECコードによる完全自由境界3次元平衡の解析結果が報告され、シャフラノフシフトを除けば有限ベータ効果はほとんどなく擾乱磁場は影響を受けないため軸対称平衡磁場と擾乱磁場の重ね合わせで十分であると結論づけられた。TAEモードに関する非線形シミュレーションコードのためのベンチマーク問題が $n=4$ のコアに局在するモードを中心に設定され、その線形挙動に関するNOVA-Kの解析結果との比較が報告された。今回報告のあったコードは核融合研のMEGA、HMGC、TAEFLであり、MEGAの結果はNOVA-Kによる解析結果とよく一致した。ジャイロ運動論シミュレーションコードGYGLESによるTAEモードの線形挙動に関する計算結果も報告された。線形解析コードのためのベンチマーク問題も今後設定される予定である。乱流が高速イオンに及ぼす影響としてジャイロ・キネティック数値実験（GENE）コード解析とASDEX-Upgradeでの実験結果が比較され、径方向拡散係数のエネルギー依存性が議論された。共同実験ではAEモードの減衰率に関するJET、MAST、ASDEX-Upgrade、TEXTORでの実験結果が報告された。また、JETでのフィッシュボーン/TAEモードによる高速イオンの損失観測の結果も報告された。

ヘリカル/ステラレータからは以下の報告があった。W7-ASを例に高速イオンの存在する場合のTAEモード数値解析コードCAS3D-Kの紹介と他コード（LIGKA、NOVA-K、KIN-2DEM）とのベンチマークの結果が報告された。LHDからはRSAEモード実験での周波数の時間変化

がStellgap/AE3Dコードでの解析と一致する等の報告と、JETとLHDでのRSAEモードを比較した議論が行われた。また、京大のGNETコードによるLHDでのNBI加熱とICRF加熱における速度分布関数の解析結果が報告され、NBI加熱の解析結果は実験データと一致することも示された。

「MHD安定性」トピカル・グループとの合同セッションでは、「MHD安定性」側からITERでのディスラプション回避の戦略ならびにTEXTOR、JET、ALCATOR C-MODでのディスラプション時の逃走電子の観測結果が報告された。

7. 「スクレイプオフ層およびダイバータ物理」

第12回会合はアムステルダム大学（ホストはオランダFOM国立研究所）で開催され、合計57名（欧：32，米：10，ITER機構：7，日：4，韓：2，露：1，中：1）の参加者があった。ITER機構から本トピカル・グループへ「ITERリサーチプラン」として多くの課題（タンゲステン・ダイバータ運転、トリチウムの蓄積評価と除去方法、炭素・タンゲステン・ベリリウム対向材の損耗と堆積の影響、ダストの評価と除去方法、過渡的熱負荷の評価）の検討が依頼されたが、それぞれの課題での優先項目と今後2年間の実験計画が議論された。特に、タンゲステン・ダイバータ運転の検討は上田（阪大）が、ダストの評価・除去の検討は芦川（核融合研）が共同議長として成果をまとめることとなった。また、ITERの運転計画に必要な課題（タンゲステン材へのヘリウム照射の影響、高周波入射による壁クリーニング、低電流でのディスラプションによる水素同位体放出、不純物ガスパフによる熱負荷制御の検討など）について現状の実験結果を議論した。さらに、非接触ダイバータのモデリングの問題点について実験との比較をもとに討論され、今後の開発計画が提案された。

日本側からは合計5件の発表が行われた。タンゲステン材へのヘリウム照射が水素によるプリスタリングを抑制すること、およびナノ構造形成に射入イオンのエネルギー閾値が存在することを上田（阪大、朝倉が代理発表）が、ITERではICRFによる壁クリーニングが計画されているが、LHDではGDCより効率が低いことを芦川（核融合研）が指摘した。容器壁からのトリチウム除去方法の検討として、JT-60Uでのディスラプション後のガス放出量とプラズマ蓄積エネルギーの関係が仲野（原子力機構）により、不純物ガスパフの減少によりダイバータプラズマが非接触状態から接触状態へ変化する際の時間応答が朝倉（原子力機構）により報告された。また、星野（原子力機構）によりSONICコードの進展（モンテカル不純物輸送コードとプラズマ輸送コードとの反復計算が可能になった）、非接触ダイバータのモデリング結果と実験結果の比較が発表され、ITERで使用しているSOLPSとの比較が期待された。

発表資料はITER機構が管理するITER-IDMに掲載されている。