



■ITPA (国際トカマク物理活動) 会合報告(24)

- 分野：「輸送と閉込め物理」<sup>1</sup>，「周辺およびベデスタル物理」<sup>2</sup>，「MHD 安定性」<sup>3</sup>，「統合運転シナリオ」<sup>4</sup>，「高エネルギー粒子物理」<sup>5</sup>，「スクレイブオフ層およびダイバータ物理」<sup>6</sup>
- 開催日：2008年10月20～22日<sup>1-5</sup>，2008年9月15～18日<sup>6</sup>
- 場所：プラズマ物理研究所「Piero Caldirola」(イタリア，ミラノ)<sup>1,2</sup>，ローザンヌ工科大学(スイス，ローザンヌ)<sup>3,4,5</sup>，長崎(日本)<sup>6</sup>
- 担当委員：井戸村泰宏(原子力機構)<sup>1</sup>，吉田麻衣子(原子力機構)<sup>1</sup>，矢木雅敏(九大)<sup>1</sup>，田中謙治(核融合研)<sup>1</sup>，林伸彦(原子力機構)<sup>1</sup>，坂本宜照(原子力機構)<sup>1</sup>，田村直樹(核融合研)<sup>1</sup>，大山直幸(原子力機構)<sup>2</sup>，浦野 創(原子力機構)<sup>2</sup>，相羽信行(原子力機構)<sup>2</sup>，神谷健作(原子力機構)<sup>2</sup>，北島純男(東北大学)<sup>2</sup>，中嶋洋輔(筑波大学)<sup>2</sup>，森崎友宏(核融合研)<sup>2</sup>，諫山明彦(原子力機構)<sup>3</sup>，榊原悟(核融合研)<sup>3</sup>，古川勝(東大)<sup>3</sup>，松永剛(原子力機構)<sup>3</sup>，山崎耕造(名大)<sup>3</sup>，渡邊清政(核融合研)<sup>3</sup>，井手俊介(原子力機構)<sup>4</sup>，鈴木隆博(原子力機構)<sup>4</sup>，長崎百伸(京大)<sup>4</sup>，中村祐司(京大)<sup>4</sup>，花田和明(九大)<sup>4</sup>，福山 淳(京大)<sup>4</sup>，濱松清隆(原子力機構)<sup>5</sup>，村上定義(京大)<sup>5</sup>，篠原孝司(原子力機構)<sup>5</sup>，藤堂泰(核融合研)<sup>5</sup>，東井和夫(核融合研)<sup>5</sup>，長壁正樹(核融合研)<sup>5</sup>，山本聡(京大)<sup>5</sup>，朝倉伸幸(原子力機構)<sup>6</sup>，仲野友英(原子力機構)<sup>6</sup>，田辺哲朗(九大)<sup>6</sup>，上田良夫(阪大)<sup>6</sup>，大野哲靖(名大)<sup>6</sup>，増崎貴(核融合研)<sup>6</sup>，芦川直子(核融合研)<sup>6</sup> (下線は当該グループの会合への出席者を，1から6の上付き数字はグループとの対応を示す)

2008年の秋季に，ITPAに関する上記6つの会合が開催された。前回までのグループが再編成されグループ名も改称されるとともに，新議長，新副議長が就任し，各国の委員も更新された。次回会合の予定(開催日程，場所)を以下に示す。

会合名	日程	場所
輸送と閉じ込め物理	3/31～4/3	原子力機構那珂研
周辺およびベデスタル物理	4/20～22	カダラッシュ(フランス)
MHD 安定性	4/6～10	デジュン(韓国)
統合運転シナリオ	3/31～4/3	原子力機構那珂研
高エネルギー粒子物理	4/6～10	デジュン(韓国)
スクレイブオフ層およびダイバータ物理	3～5月，4日間	米国(3～5月)・欧州(5月)(検討中)

1. 「輸送と閉じ込め物理」

本会合は，今までの「閉じ込めデータベースとモデリング」および「輸送物理」トピカルグループが統合されて初

めての会合として，また「周辺およびベデスタル物理」トピカルグループとの合同会合として開催された。会合には，38名(米国：15名，欧州：12名，日本：9名，韓国：1名，ITER：1名)が出席した。本グループの新議長は Stan Kaye (PPPL, 米国)，新副議長は Shaojie Wang (ASIPP, 中国) と Wayne Houlberg (ITER 機構) である。主に ITER 研究計画における輸送関係の課題や装置間比較実験の進展と今後の予定について議論するとともに，粒子・不純物輸送，プラズマ回転・運動量輸送，LH 遷移物理，コア輸送・モデリング，等についてセッションを設けて議論を行った。この中で，LH 遷移物理だけ，「周辺およびベデスタル物理」グループとの合同セッションであった。

粒子と不純物輸送のセッションでは，実験で観測された密度ピークと線形・非線形ジャイロ運動論コード GS2 で計算された粒子フラックスとの比較や，粒子フラックスに対するプラズマ回転の効果をジャイロ運動論で解析した結果等が報告された。田村(核融合研)は，LHD でコアに直接入射した不純物と壁で発生した不純物の特性の違いについて報告し，IDB の様な高密度ではコアに入射された不純物は蓄積されるが，壁で発生した不純物はエルゴディック層の摩擦力でコアへの侵入が妨げられることを示した。田中(核融合研)は，LHD と JT-60U の低衝突周波数領域の粒子輸送と揺動の比較研究を報告し，LHD の内(外)寄せ配位で密度ピークの衝突周波数依存性が JT-60U と同じ(逆)になることを示した。JT-60U の ELM<sub>MyH</sub> モードで NBI パワーを増加した場合密度分布はピーキングし径方向の乱流揺動の相関は増加する一方，LHD では NBI パワーを増加したときコアの密度の吐き出しが観測され密度分布は平坦化しコアの乱流揺動が増加すること等を報告した。

プラズマ回転と運動量輸送のセッションでは，ジャイロ運動論による運動量輸送評価や自発回転の理論研究から，自発回転比例則の検証や変調による運動量輸送評価等の実験研究等，幅広く報告や議論が行われた。吉田(原子力機構)は，JT-60U における ECRF のトロイダル回転や運動量輸送への影響について，熱輸送との比較も含めながら報告した。鎌田(原子力機構)は，JT-60U における ELM や LH 遷移時のトロイダル回転変化を報告し，ELM がイオン・電子温度よりも広い領域で回転を変化させること等を示した。

LH 遷移物理のセッションでは，LH 遷移しきいパワー ( $P_{LH}$ ) のイオン種依存性，密度依存性，トルク入力の影響等の実験結果が各装置から報告された。大山(原子力機構)は，JT-60U ではイオン加熱と電子加熱で  $P_{LH}$  に顕著な差はないことを報告した。ASDEX-U 装置からはヘリウムと重水素で  $P_{LH}$  に違いはないこと，イオン加熱と電子加熱で  $P_{LH}$  に顕著な差がないことが報告された。一方，DIII-D 装置からは軽水素の  $P_{LH}$  は重水素の約 2 倍であること，プラ

ズマ電流方向のトルク入力が小さい方が $P_{LH}$ が下がること  
が報告された。ITER プラズマでの予測の観点から理論・  
モデリングの重要性が指摘されるとともに、各装置から  
LH 遷移研究の代表者を選出することで合意した。

コア輸送・モデリングのセッションでは、イオンの熱拡  
散係数のトロイダル回転依存性や安全係数の有理面通過で  
誘起される ITB 形成の実験結果、EU の統合コード開発と  
ITER シミュレーションの現状、非線形コードの結果を模  
擬した準線形モデルの開発状況等が報告された。矢木 (九  
大) は、マルチスケールの相互作用を考慮した ITG 乱流  
コードにより ITB 形成・崩壊をシミュレーションした結  
果、ITG モードの非線形結合がメソスケールモード (メ  
ディエータモード) を誘起し、その非局所相互作用と、ITG  
モードの turbulence spreading による障壁内への浸透が競  
合して ITB の崩壊が始まることを初めて示した。ただ  
し、崩壊の最終段階においては、準線形効果が卓越し、  
ITB foot 近傍に ITG モードが強く励起し、フローシャーに  
よる安定化を卓越した段階で完全な崩壊へと至る。林 (原  
子力機構) は、統合コード TOPICS-IB を用いたシミュレ  
ーションにより、SOL の磁力線方向輸送と結びついたペデ  
スタルの新古典輸送のモデルが JT-60U で得られた ELM 間の  
エネルギー閉じ込め時間の比例則を再現できることを示  
し、ITER 定常運転シナリオベンチマークにおけるモデル  
検証結果について報告した。

装置間比較実験のセッションでは、坂本(原子力機構)が  
JT-60U と JET における内部輸送障壁の比較実験について、  
初期的な解析結果を報告した。また、実験の進展状況と今  
後の予定について議論され、9 件の項目を終了する一方  
で、新規に 5 件の提案があった (継続は 8 件)。

## 2. 「周辺およびペデスタル物理」

本会合には 23 名 (欧州 8 名, 米国 11 名, 日本 4 名) の参  
加者があり、本グループの新議長は Howard Wilson (ヨ  
ーク大, EU), 新副議長は 大山直幸 (原子力機構) と Alberto  
Loarte (ITER 機構) である。ITER に対する緊急課題の一  
つである「ELM の低減化」に関する各国の研究の検討・評  
価を主要トピックとして、専用の外部 (RMP) コイルを用  
いた磁場の印可によってプラズマ周辺部の磁場構造を乱す  
ことで ELM を極小化する手法を用いた実験・シミュレ  
ーションの現状報告、周辺輸送障壁幅のベータ値依存性、  
ITER へ向けた H モード遷移パワーしきい値の予測などを  
中心として、2009 年における提案、本トピカルグループの  
今後 1 年間の活動計画の策定等に関して発表・議論が行わ  
れた。

大山 (原子力機構) より JT-60U における ECH による周  
辺加熱を用いた ELM 制御についての報告、および JT-60U  
を用いた装置間比較実験の結果についての報告があった。  
浦野 (原子力機構) は H モード時におけるプラズマ電流分  
布の変化による周辺プラズマ構造および ELM 特性への影  
響についての報告を行った。プラズマ周辺領域の電流分布  
を変化させる実験を行い、周辺圧力分布構造の変化は小さ  
いが、周辺電流分布を減少させると ELM の周波数が増加

することを示した。さらに相羽 (原子力機構) は、原子力  
機構における ELM の物理機構の解明をめざした数値・モ  
デリング研究の近年の成果として、トカマク統合シミュ  
レーションコード TOPICS-IB を用いた ELM による熱・粒  
子輸送の評価結果、プラズマ回転を考慮した電磁流体力学  
的安定性解析コード MINERVA の新規開発によって得ら  
れた初期解析結果を報告した。本会合においては、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)ペデスタル特  
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  
デスタル構造予測モデルのベンチマークに対するグループ  
活動方針について議論し、これら 4 つのワーキンググル  
ープを設置することで合意した。

## 3. 「MHD 安定性」

第 12 回目となる本会合の出席者は約 30 名で、内訳は米国  
から 12 名, EU から 7 名, 日本から 3 名, ロシアから 3 名等  
であった。本グループの新議長は Abhijit Sen (IPR, イン  
ド), 新副議長は Edward Strait (GA, 米国) と Yuri Gribov  
(ITER 機構) である。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、会合の一部は平行して行われ  
ている高エネルギー粒子トピカルグループ、統合運転シナ  
リオトピカルグループと合同で行われた。

ディスラプションに関しては、ハロー電流、逃走電子、  
ディスラプション緩和に関する実験結果 (ASDEX-U, C-  
mod, NSTX)、および ITER におけるディスラプション時  
のブランケットや真空容器への電磁力の予測に関する発表  
等があった。また、6 月に開催された逃走電子ワーク  
ショップの概要報告があり、逃走電子の損失に関する情報  
が特に欠けているとの発表があった。

プラズマ制御に関しては、垂直安定性 (VS) や誤差磁場  
補正等に関する発表があった。ITER の垂直安定性に関す  
る発表では、VS コイルを増強した場合の予測計算を行っ  
た結果、真空容器内 VS コイルが最も制御性が高いとの報  
告があった。また、プラズマの垂直変動に対する制御性  
に関する共同実験の報告もあった。

NTM に関しては電子サイクロトロン (EC) 電流駆動に  
よる NTM の安定化およびフロー速度シアがある場合の安  
定性に関する発表があった。諫山 (原子力機構) は JT-60U  
における NTM 研究として、NTM の回転に同期して EC  
波を変調入射して電流駆動を行った場合、無変調の場合よ  
り 2 倍以上安定化効果が大きいという発表をした。古川  
(東大) はプラズマ回転シアを含めた漸近接続の定式化と数  
値計算例を示し、回転シアが古典的テアリングモードの成  
長率を有意に増大させること、また、粘性がある場合には  
回転シアがテアリングモードを不安定化し得ることを発表  
した。また、共同実験の報告として、プラズマ回転と NTM  
発生条件の関係に関する発表があった。

RWM に関しては、プラズマ回転による安定性および他  
の不安定性との相互作用について議論が行われた。また 3

次元抵抗壁の体積効果を考慮したRWMモデリングコード(CarMa)の結果が報告された。松永(原子力機構)はJT-60UにおけるRWM研究として、自由境界理想MHD限界を超えた領域で新たに観測された高エネルギー粒子駆動壁モード(EWM)の特性、およびELMによって駆動されたRWMについて発表を行った。また、RWM安定化に必要なプラズマ回転、および他の不安定性のRWM安定性への影響に関する装置間比較研究を今後進めていくことで合意した。

#### 4. 「統合運転シナリオ」

本グループは「定常運転」トピカル物理グループから改称されたもので、今回が第一回目の会合である。会合には、34名(日本:7, 欧州:13, 米国:11, ITER機構:3)が出席した。本グループの新議長は井手俊介(原子力機構)、新副議長はAdrianus Sips(EC,EU)とJoseph Snipes(ITER機構)である。「定常運転」トピカルグループでは、主にITERのハイブリッドや定常運転等のいわゆる先進運転が主な対象であったが、改称と同時にチャーターも改められ、標準運転も含めたITER運転シナリオ全般を議論の対象とすることとなった。本会合では、ITERの運転シナリオ(標準運転、ハイブリッド運転、定常運転)確立に向け、本トピカルグループが主導する国際装置間比較実験、モデリングの各国に於ける進展について議論を行った。また、ITERの最優先研究課題(プラズマ立ち上げ/立ち下げ、加熱・電流駆動等)に関して取り組みの議論を行った。

国際装置間比較実験に関しては、各装置から進捗状況の報告があった。JETからは高規格化圧力( $\beta_N > 3$ )への先進運転領域の拡張等、DIII-DからはITER相似形状での先進運転性能の評価等、JT-60Uからも先進運転領域拡張、特に壁なしの理想MHD限界を超えた高 $\beta_N$ 領域等の報告があった。また、来年行う国際装置間比較実験に関して議論を行い、従来の先進運転開発に関連したものに加えITER標準運転のデモンストレーション放電開発に関した提案等も加えることとなった。

モデリング・シミュレーションに関しては、原子力機構、PPPL, EPFL等からTSCやPTRRANSP, DINA, CORSICA等を用いた標準運転やプラズマ立ち上げ時のシミュレーション結果に関する報告があり、不純物蓄積のプラズマ性能に与える影響、加熱効果による立ち上げ時の消費磁束の低減等に関する結果が示された。また、先進運転を対象にした国際的なシミュレーション・ベンチマーク活動に関して、現状や課題に関して議論を行った。

加熱・電流駆動に関連しては、ITERにおけるICRFのシミュレーションの進展、特にfull wave手法を用いたものについて京都大学やMITから示された。MITからはLHCDに関するコードベンチマークの進展に付いても報告があった。また、今回は同時に開催されていた「高エネルギー粒子」トピカルグループと合同セッションを持ち、NBCDに関して議論を行い、高速イオンの閉じ込めがNBCDに及ぼす影響等について「高エネルギー粒子」グループからデータを提供することとした。同グループとは他に、アルファ

粒子による電流駆動等の議論も行っている。

また、「MHD」トピカルグループとも、合同セッションを持ち、ITERの運転シナリオ確立に必要な「MHD」グループからの情報に関して議論を行い、垂直安定性やベータ限界に関して必要な情報が提供されることとなった。

ITERの最優先研究課題(プラズマ立ち上げ/立ち下げ、加熱・電流駆動等)に関して、今後どのような取り組みをするかについて議論を行った。

#### 5. 「高エネルギー粒子物理」

今年の6月より高エネルギー粒子を扱うグループが「MHD」トピカル・グループから独立し、新しく「高エネルギー粒子物理」トピカル・グループが発足した。本会合は発足後最初の第1回となる会合であった。会場では、本グループに加え、「MHD」と「統合運転シナリオ」トピカル・グループも会合を行い、一日目は3つないし、2つのグループによる合同セッションで進められた。「高エネルギー粒子物理」トピカル・グループの出席者は委員・専門家を含め、約30名であった。そのうち日本側からは6名が参加した。本グループの新議長はSybille Guenter(IPP, EU)、新副議長は篠原孝司(原子力機構)とVladimir Mukhovatov(ITER機構)である。発足後最初の会合であり、まず始めに本グループのスコープに関する議論を行い、他グループと強く関連するNBCDなどのトピックについては互いのインターフェイス/境界をどうするか議論した。

3日間の会合では27件の発表があり、ITERのトロイダル磁場リップルによる高速イオン輸送、アルペン固有モード(AE)実験、AEの線形コード、AEの非線形コード、高速イオン計測などに関する発表があった。新しいグループの発足により専門分野が特化したこともあり、全般的にこれまでになく活発な議論がなされた。

ITERのトロイダル磁場リップルによる高速イオン輸送については、原子力機構のF3DOFMCコード、EUのASCOTコード、ロシアのHYBRIDコードというそれぞれの旋回中心近似のOFMCにて計算結果を発表した。これらのコードはそれぞれ、互いにベンチマークを行ってきたが、一番損失が危惧されており、また、磁場構造が現時点で最も複雑なケース(リップル低減フェライト鋼(FI)と強磁性体でできているテストブランケットモジュール(TBM)からなる体系)でのベンチマークを行うことになった。これらの強磁性体をプラズマありで評価した磁場は原子力機構のFEMAGコードでのみ作成できるため、本コードで作成した磁場を提供し、ベンチマークを行うこととなった。また、これまできちんとした評価が行われていなかった電場の効果について、原子力機構より報告があった。TBMのケースでHモードのような負の電場があるとき3倍近く損失が増加しており、その重要性が明らかになった。一方、PPPLでは旋回中心近似ではなく、そのまま粒子軌道を追う計算を行ったところ、旋回中心近似よりもはるかに大きい輸送が観測されたとの報告があった。これが本当であれば、ITERのアルファ粒子閉じ込めに致命的な影響が出るため、類似のコードを用いた検証を進めるこ

ととなった。

AE 実験については、LHD における RSAE と GAM の相互作用の実験結果、CHS において観測された高速電子励起の不安定に関する報告、JET での AE 減衰率測定実験、AS-DEX での損失イオンプローブ測定による実験の報告がなされた。

AE の線形コードについては、米国で二つのグループにわかれて行われている検証活動の報告が行われた。今後、AE 減衰率測定実験のサポートも念頭に、コード間のベンチマークの進め方が議論された。本件には、福山(京大)の TASK/WM も参加することとなった。

AE の非線形コードとして NIFS の MEGA コードとフランスカチ研究所の HMGC コードの最近の成果が報告された。今後、これらに加え、M3D コードなどとのベンチマークを進めることとなったが、まずは、解析的に解けているようなケースでの線形過程のベンチマークを行うこととなった。

「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では電流駆動に関する議論が行われたが、原子力機構から粒子軌道幅の効果を取り入れた評価についての報告があり、粒子軌道幅を無視した解析解より多くのアルファ粒子駆動電流が流れる可能性が指摘された。

高速イオン計測については、JT-60U から DT 中性子の同時計測可能となったデジタル処理中性子分布計測について報告があった。DIII-D からは高速カメラを用いて Bremsstrahlung 光を用いたモード構造の 2 次元測定と、同じカメラにフィルタを使用することで実現した高速イオン Dalphi 計測 (FIDA) による高速イオン分布の 2 次元測定についての報告があった。

加えて、原子力機構より、TOPICS-IB コードへの導入を目的として開発された高速イオン輸送モジュールが紹介された。

## 6. 「スクレイプオフ層およびダイバータ物理」

第11回会合は ICPP (福岡) のサテライト会合として長崎 (九州大学がホスト) で開催され、日、欧、米、露、中、韓、ITER 機構から合計44名、日本からは23名の参加者があった。新議長に B. Lipschultz (MIT, 米国)、副議長に E. Tsitrone (CEA, EU)、嶋田 (ITER 機構) が就任して初めての会合であり、各国の委員も更新された。ITER の運転計画を考える上で必要とされる多くの検討項目、特に、水素同位体 (トリチウム) 蓄積量の予測についてタングステン材およびその表面の損傷・脆化による効果およびベリリウムや炭素との混合堆積層での議論が前回に引き続き進められた。今回、ITER 機構からの要請として、(i)運転開始時

における軽水素の低減方法、(ii)ダスト(再堆積層を含む)の集積量の評価をタイル損耗・再堆積量のバランスと分光測定により行う可能性、(iii)RF シースで加速された高速電子・イオンによる第一壁の損傷などの問題について集中した議論を行った。

日本側からは合計16件の発表が行われた。タングステン材の水素同位体の吸蔵に関して高速イオンによる損傷と熱処理の影響について上田 (阪大) が、高速中性子による損傷と影響のまとめを吉田 (直) (九大) が、表面脆化による吸蔵・放出過程の検証を星平 (九大) が、格子欠損による吸蔵モデルからの指摘を加藤 (核融合研) が、TRIAM-1M でのモリブデン共堆積による長時間水素吸蔵と共堆積への酸素不純物の効果を坂本 (九大) が発表した。JT-60U でのタングステン輸送とコアプラズマへの蓄積条件および再堆積分布の結果が仲野 (原子力機構) と上田から発表された。日本側から多くの発表が行われるとともに、ITER 機構のダイバータ計画に対する日本の研究者の意見として本年の合同会合 (エネルギーフォーラム・SOL ダイバータサブクラスター、核融合研・PWI 研究会、特定研究「核融合トリチウム」A 班) でまとめた内容を上田が代表で発表した。

ITER 機構から要請された項目では、(i)軽水素の低減方法として JT-60U の実験期間の開始時に 2 - 3 週間行なわれる経験を仲野が、(ii)炭素損耗・再堆積バランスに対するダスト量の評価結果と分光測定による炭素イオン発生量との関係を朝倉 (原子力機構) が、浮遊ダストの正確な位置・速度の測定について LHD で行われた反射像を利用した方法を芦川 (核融合研) が発表した。

炭素によるトリチウム共堆積とその除去に関するセッションでは、JT-60U 第一壁タイル表面の損耗と側面での再堆積・共堆積結果を吉田 (雅) (九大) が、第一壁・ダイバータタイル表面への吸蔵特性と同位体による置換効果を含めたまとめを田辺 (九大) が、LHD のアイランドダイバータの排気ダクトにおいて水素共堆積比が高くなる結果を増崎 (核融合研)・日野 (北大) が、化学損耗・堆積モデルを城壁型タイル形状に適応したシミュレーション結果を大宅 (徳島大) が発表し、最後に田辺により本セッションのまとめと考慮すべき問題点 (高温壁運転の必要性、酸素の問題点、CFC 構造の問題点など) が提示された。また、大野 (名大) は、デタッチダイバータでのバイアス印加実験により水素原子・分子の化学損耗過程への寄与の評価を発表した。

発表資料は、今後 ITER 機構により管理される WEB (ITER-IDM) に掲載されるため、アクセスを希望される方はアカウント登録のため国内委員に連絡ください。

(原稿受付：2008年11月28日)