

■ITPA (国際トカマク物理活動) 会合報告(47)

- 分野: 「ペDESTAL物理」¹, 「輸送と閉じ込め物理」², 「統合運転シナリオ」³, 「スクレイプオフ層およびダイバータ物理」⁴, 「高エネルギー粒子物理」⁵, 「MHD安定性」⁶
- 開催日: 2014年10月20日-22日^{1,2}, 2014年10月20日-23日^{3,4}, 2014年10月21日-23日^{5,6}
- 場所: サン・ポール・レ・デュランス(フランス)¹⁻³, プラハ(チェコ)⁴, パドヴァ(イタリア)⁵⁻⁶

担当委員:

相羽信行(原子力機構)¹, 浦野創(原子力機構)¹, 神谷健作(原子力機構)¹, 鈴木康浩(核融合研)¹, 中島洋輔(筑波大)¹, 森崎友宏(核融合研)¹, 本多充(原子力機構)², 吉田麻衣子(原子力機構)², 坂本宜照(原子力機構)², 宮戸直亮(原子力機構)², 田中謙治(核融合研)², 田村直樹(核融合研)², 井戸毅(核融合研)², 井手俊介(原子力機構)³, 林伸彦(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, 朝倉伸幸(原子力機構)⁴, 芦川直子(核融合研)⁴, 上田良夫(阪大)⁴, 大野哲靖(名大)⁴, 坂本瑞樹(筑波大)⁴, 仲野友英(原子力機構)⁴, 増崎貴(核融合研)⁴, 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, 長壁正樹(核融合研)⁵, Andreas Bierwage(原子力機構)⁵, 村上定義(京大)⁵, 山本聡(京大)⁵, 諫山明彦(原子力機構)⁶, 榊原悟(核融合研)⁶, 古川勝(鳥取大)⁶, 政宗貞男(京都工繊大)⁶, 松永剛(原子力機構)⁶, 山崎耕造(名大)⁶, 渡邊清政(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
ペDESTAL物理	2015年3月10-12日	ガンディーナガル(インド)
輸送と閉じ込め物理	2015年3月10-12日	ガンディーナガル(インド)
統合運転シナリオ	2015年4月20-23日	バルセロナ(スペイン)
スクレイプオフ層とダイバータ物理	2015年6月9-12日	ロシアあるいは米国
高エネルギー粒子物理	2015年3月25-27日	サン・ポール・レ・デュランス(フランス)
MHD安定性	2015年4月14-17日	サン・ポール・レ・デュランス(フランス)

1. 「ペDESTAL物理」

本会合には36名(欧州16名, 米国9名, ITER機構2名, 日本3名, 中国4名, 韓国2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)共鳴磁場摂動(RMP)コイルを用いたELM抑制・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)ベレット入射による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。また, 今回は不純物がペDESTAL物理に与える影響に関するスペシャルセッションが設けられ, 金属壁をもつJETお

びASDEX Upgradeの他に, 不純物入射実験を行った各国の装置における実験結果が報告された。

JETでは, 金属壁状況下の高三角度Hモードにおいて窒素ガスおよびネオンガスを入射し, それぞれのペDESTAL構造を比較する実験を実施した。窒素ガスを入射した場合, ELM直前の周辺温度が上昇し炭素壁の場合と同レベルまで周辺プラズマ圧力が回復する。一方で, ネオンガスを入射した場合, 周辺プラズマ圧力が増加せず, 窒素ガスを入射した場合と比べて放射損失が増大することと関連している可能性が示唆された。DIII-Dにおける窒素ガス入射実験では, JETの炭素壁でのHモード同様に周辺プラズマ圧力分布に特に大きな変化がみられなかった。浦野(原子力機構)からJT-60Uにおける不純物入射Hモード実験の結果が報告された。高密度領域ではペDESTAL幅が周辺部の衝突周波数の増加に伴って広がる一方でアルゴン入射した場合は衝突周波数が小さく, ペDESTAL幅が狭いことを示した。同様の結果は金属壁を持つJETでも観測されており, どのような状況下でペDESTAL幅が衝突周波数に依存するのかを調査することが今後の課題として議論された。

RMPコイルを用いたELM抑制・低減化については, ASDEX UpgradeからRMP印加によるELM抑制に必要な低衝突周波数領域において, RMP印加の位相により, ELMの制御性およびプラズマ密度の減少割合が変化することを発見したという報告があった。DIII-Dからは, 12個あるRMP印加用のコイル数を5個まで減らした状態でのELM抑制に成功したという報告があった。但し, コイルを減らしたことによって低トロイダルモード数の不安定性が誘起されやすいため, これを抑制する工夫が必要になる。また同装置ではRMP磁場がつくるセパトトリクス部の磁場の乱れについての解析結果の報告があり, 外部キンクモード的なプラズマ応答が磁場の乱れを決める支配的な役割を果たしており, RMP磁場の強度および位相がその応答を評価する上で重要であることが示された。

ペDESTAL構造の理解に関しては, DIII-DからELMによるペDESTAL崩壊後の回復は, 密度分布の回復が温度分布に比べて早いことが報告された。同様の研究はASDEX Upgradeでも行われており, 今後の比較・検討について議論された。また, Alcator C-Modで発見されたI-modeについて, ASDEX UpgradeおよびDIII-Dでも同様の放電が再現できたこと, またそのいずれの装置においてもペDESTAL領域での乱流の性質変化が確認されたとの報告があった。鈴木(核融合研)からMIPSコードおよびNIMRODコードを用いて, DIII-DにおけるELMで発生するBlob構造を評価し, 両コードで同程度の非線形成長率が得られるという報告があった。電子の反磁性回転による強いフローシアによってモード構造が変化し, 非線形成長率が抑制されることを示した。

2. 「輸送と閉じ込め物理」

第13回となる本会合には40名(日本4名, 欧州23名, 米国5名, 韓国2名, 中国2名, インド2名, ITER機構2名, リモート参加も含む)が参加した。会合はジャイロ運

動論シミュレーション・理論、回転、Lモードのコアエッジ輸送、分布の硬直性、準線形モデリングとプラズマ計測、国際共同実験などのセッションから構成され、各セッションにおいて活発な議論がなされた。

はじめにITER機構のLoarte氏からITER建設の進捗状況の説明とともに、ITERの閉じ込め・輸送における課題、特に、ヘリウムによるHモード運転、主イオンの粒子輸送と燃料補給、Hモード運転におけるタングステンの輸送制御、プラズマ対向材の閉じ込めへの影響とベータ値スケールリング、高閉じ込めHモードへの出入りが優先度の高い課題として示された。

ジャイロ運動論シミュレーション関係では、フランスCEAからグローバルジャイロ運動論コードによる不純物輸送のシミュレーションの報告があった。不純物の輸送では衝突による輸送が乱流輸送と同程度になりうるので、異粒子種間の衝突項を実装し、重水素-ヘリウムプラズマのシミュレーションを行った結果と衝突輸送理論との詳細な比較が示された。原子力機構からは、JT-60Uプラズマを対象にした局所ジャイロ運動論シミュレーションについての報告があった。従来から進められているLモード放電に加えて、Hモード放電についてのシミュレーション結果も報告された。どちらの放電についても、外側コアにおいてシミュレーションから得られる熱輸送係数は実験結果よりも小さいが、その意味が異なることが示された。Lモードの場合、外側コアにおける線形不安定性の成長率は内側コアよりも大きい、強い帯状流により乱流輸送が抑制されるのに対して、Hモードの場合、外側コアでは線形不安定性自体が弱まり、それによる輸送も小さくなっている。これらシミュレーション結果と実験結果との乖離の解消のためには、局所モデルを越えた大域的なシミュレーションの必要性が指摘された。このいわゆる short fall 問題に関連して、DIII-DのLモードプラズマを対象とした局所ジャイロ運動論シミュレーションの報告では、長波長のモードの振幅が大きく、ゆっくりとした振舞いをするため、乱流輸送の時間平均を評価するときに十分長い時間をとる必要があることが示された。しかし、そのシミュレーション結果をみるとトロイダル方向に最長の波長をもつ揺動が最大の振幅を持っており、その方向の領域の大きさが十分ではない可能性がある。一方、コアプラズマだけでなくSOLプラズマをも取り扱うことができるジャイロ運動論コードXGCIを用いて short fall が現れるDIII-Dプラズマのシミュレーションを行ったところ、外側コアでは実験と同程度の熱流束が得られたとの報告があった。だが、コードに用いている標準的なジャイロ運動論モデルがプラズマ端領域では有効ではないのではないかと、計算時間が十分ではなく乱流が準定常状態に達していないのではないかと、などの指摘が相次いだ。

実験関係では、主にプラズマ回転、装置間比較実験、分布の硬直性、HモードペDESTALと閉じ込めおよびITERに向けたヘリウム実験（ペDESTALTピカルグループとのジョイントセッション）のセッションにおいて、各装置からの報告がなされた。プラズマ回転のセッションでは、

Tore Supra から低域混成波電流駆動時のプラズマ回転は、プラズマ電流の大きさでその回転方向が変わることが報告された。また、Tore SupraでもC-Modと同様にLOC（密度と閉じ込めが線形な関係である領域）からSOC（閉じ込めが飽和状態にある領域）への遷移時のプラズマ回転の変化が観測されたと報告があった。装置間比較実験のセッションでは、ASDEX Upgradeにおけるヘリウム密度勾配はDIII-Dと同様に電子密度勾配に比例すると報告された。JETではガスパフを用いた粒子の摂動輸送実験がLモードおよびHモードで行われ、粒子ソースの評価が今後の課題であることが議論された。DIII-DおよびASDEX Upgradeでは、Iモード運転において加熱パワーを増加しても閉じ込め劣化が起きていないことが報告された。分布の硬直性のセッションでは、JETの電子の輸送においてパワースキャンから得られた分布の硬直性としきい値は、摂動輸送実験で得られた輸送特性と矛盾のない結果が得られたと報告があった。

3. 「統合運転シナリオ」

第13回の本会合はCEAカダラッシュ研究所で行われ、日本1名、欧州17名、米国7名、韓国1名、ITER機構5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/電流駆動等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、トロイダル磁場2.65 T運転でのコイルにかかる力の解析、容器内コイルや加熱・電流駆動装置開発の現状、ITER研究計画等について報告があった。また、特にITERプラズマの停止シナリオについて、電磁力や壁への熱負荷の制限条件等の説明があり、実験/モデリング等に関する調査・検討を要請された。これに関連して、JETにおけるプラズマ立ち下げ・停止実験の報告があった。ITERでは初期にヘリウムを用いたHモード運転が考えられている。特にヘリウムHモードにおけるELMの特性と、ELM制御性が問題とされている。DIII-Dから、ヘリウムプラズマでも重水素プラズマと同様なELMが発生し、制御コイルによる抑制が可能であることが示された。

国際比較実験に関して、12月の調整委員会で報告するため、各実験の進捗状況について議論し終了や継続を判断した。ITER標準放電と相似な放電を再現する比較実験では、従来より複数の装置でそのような放電を開発してきたが、JETではプラズマ電流4 MAでそのような放電が得られた。ITER標準放電における不純物による熱負荷低減シナリオ開発に関する比較実験では、JET等での不純物入射と

それによる閉じ込め改善結果が報告された。この他、先進運転開発やイオンサイクロトロン加熱や低域混成波電流駆動に関する比較実験の結果等が報告された。現状の国際比較実験はすべて2015年への継続を予定することとなった。

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。特に、粒子輸送について、ITER 標準シナリオを対象に粒子輸送に関するモデリングとセンシティブティの検証についての共同研究の提案と議論があった。今後、複数のコードを用いてベンチマークを行う。

輸送と閉じ込め物理とペデスタル物理両トピカルグループと ITER 機構において半日の合同セッションを持った。エネルギー閉じ込めのベータ依存性やペデスタル安定性の議論、ITER のヘリウム運転に向けた ELM 特性や抑制、粒子補給、シナリオ開発等について議論を行った。

次回の会合では、国際比較実験等の通常の議論に加え、ITER 初期プラズマや粒子補給モデリング等について議論を行う予定である。

4. 「スクレイプオフ層およびダイバータ物理」

第20回会合には、合計58名の参加があった：欧州35名、米国7名、日本6名、中国5名、ロシア1名、オーストラリア1名および ITER 機構3名。会合が開催されたチェコ科学アカデミー・プラズマ物理研究所では、カラム研（英国）にあったトカマク COMPASS が移設され、ITER に関連した第一壁の形状と熱負荷分布の関係や周辺プラズマの実験が積極的に行われている。

ITER 機構が急いでいる「フルタングステン・ダイバータ」に関する工学設計の課題：高熱負荷照射で一部のタングステン(W)モノブロックに発生した亀裂を低減する圧延手法やリーディングエッジの形状の仕様などが報告されるとともに、運転リスクを軽減するため要請している物理研究の課題：JET等でのWダイバータ実験、モノブロックの溶融現象とそのモデリングの確立、モノブロック間のギャップでの高エネルギーイオンによる損耗の検討、ヘリウム照射の影響などを中心に議論が行われた。

周辺およびダイバータ・プラズマ研究分野での主な結果として、JET-ILW からタングステン材への ELM 熱負荷と粒子放出への影響、ASDEX Upgrade からダイバータにおけるエネルギー散逸効果（いわゆる S パラメータ）のスケーリングの検討、DIII-D からセパトリス付近でプラズマ温度・密度分布を決める要因の検討、複数の装置から不純物入射による熱負荷の制御手法と非接触ダイバータのモデリングの進展報告が行われた。いずれもプラズマ輸送や原子分子過程など多くの要因が伴うため今後の進展が望まれる。また、JET-ILW や ASDEX Upgrade で行われている窒素ガス入射に伴い発生するアンモニアは、核融合炉では主にトリチウム処理・回収に影響するため ITER からその定量化と代替希ガスの検討が要請された。

W ダイバータに関する主な報告として、リーディングエッジへの熱負荷を減らすことを目的とした形状の調整（シェーピング）について、トカマクや照射装置による実験

とシミュレーションの結果が示され議論が行われた。Magnum-PSI (DIFFER, オランダ) の実験では、リーディングエッジへの熱負荷は、幾何学的形状から予想される値と同程度であったが、ラーマー半径効果を入れたシミュレーションではエッジへの熱負荷はそれよりも軽減されることが予想される。JET-ILW での実験でも熱負荷が軽減されることが報告されており、この課題は検討が必要である。

水素同位体の真空容器内蓄積に関して、JET-ILW では以前の炭素対向壁での実験と比較して一桁以上少ないことが報告されているが、今回はタイル表面分布測定の結果（約3割がベリリウム (Be) 第一壁に、7割がダイバータ部に蓄積）が示された。後者の多くは内側ダイバータ上部に Be 堆積層とともに共堆積する。Be と重水素(D)の共堆積については PISCES-B (UCSD) から、ITER で形成される Be-D 層の模擬実験結果が報告され、ショット間ベーキングの効果が議論された。プラズマ対向材料の損耗・輸送として、JET-ILW における ERO と WallDYN コードを用いたプラズマ対向材料や窒素の輸送モデリング結果が報告された。また、ITER のダスト源が主として Be の堆積層剝離や過渡的熱負荷による溶融と想定されるとの報告があり、ダストのモニタ計画が紹介された。最初の JET-ILW 実験後に真空容器内で採取されたダストが原子力機構六ヶ所研に輸送されたことが報告され、今後の分析結果を期待された。

日本から4件の報告が行われた。星野（原子力機構）から、SONIC コードを用いた JT-60U の非接触ダイバータシミュレーションの進展結果と、SONIC と SOLPS とのベンチマークを目的に始められた JET-ILW ダイバータシミュレーション結果が報告された。プラズマガンを用いた W へのパルスプラズマ照射実験として、菊池（兵庫県大）から W 表面への Be 堆積層を模擬した Al コーティング層による蒸気遮蔽効果ならびに、W ナノ構造形成によるエネルギー伝達の変化について報告された。NAGDIS-II (名大) における重水素プラズマ照射中のタングステン中のダイナミックリテンションの評価結果が上田より示され、プラズマ照射後の静的蓄積に比べて蓄積量はかなり増加する (450 K で4倍程度) ことが明らかになった。増崎（核融合研）からは、LHD におけるヘリウム長パルス放電中の壁排気特性の変化とともに、LHD での材料プローブを用いた炭素堆積層中のヘリウム共堆積層の分析結果、および大阪大でのイオンビーム照射による炭素材へのヘリウム蓄積に関する基礎実験の結果が、それぞれ長パルス中の壁排気特性と比較され、特性が変化した要因として報告された。

5. 「高エネルギー粒子物理」

本会合は第13回となり、参加者は約30名、30件の発表があった。

はじめに、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、および、前回の会議でのアクションアイテムの確認が行われた。

共同実験では、アルヴェン固有モード (AE) の非線形時間発展を扱う共同実験 EP4 については、前回の会議で共同

実験としては終了することとしたことを受けて、これまでの実験の成果の確認が行われ、今後の活動が解釈のためのモデリング活動となることが示された。DIII-DのTest blanket module (TBM) モックアップ磁場環境下の高速イオン閉じ込め評価を行うEP5では、新古典テアリングモード (NTM)、鋸歯状振動、ELM制御コイル (ELMC)、AEによる磁場擾乱とモックアップ磁場の相乗効果に着目した実験結果が発表された。鋸歯状振動との相乗効果については明確な結果が示された。それ以外については、広い意味での相乗効果と解釈される結果が得られた。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、ASDEX Upgradeでのコイル電流変調の実験結果が示された。2台の高速損失イオンプローブ (FILD)のうち片方にだけ電流変調と相関のある信号強度の変化が観測されていた。JETからは誤差磁場補正コイルを用いた磁場擾乱が高速イオン閉じ込めに与える影響を調べる実験が初めて実施された旨報告された。DIII-Dにおいては、プラズマのベータ値と擾乱磁場強度との関係、FILD信号強度変化との関係が調査された。ベータ値とともに擾乱磁場強度が増加しており、これはELMC印加に伴うプラズマの応答と考えられる。同様のベータ値依存性がFILD信号強度変化にも観測された。また、ELMCの磁場擾乱によりプラズマ端面での高速イオンが損失して、ダイバータ部での熱負荷増加を示唆する結果も紹介された。ECHによるAEの制御に絡むEP7では、DIII-D、ASDEX Upgrade、JET、Heliotron J、LHDでの実験結果が発表された。Heliotron Jでは磁場シアの増加によるAEの安定化の解釈が紹介されたが、他の装置でのECHによるAE挙動の変化は現時点で説明できていない。特にECH入射直後にAEが即座にตอบสนองする時間スケールを何が決めているのかが話題となった。

線形コードのベンチマーク活動は、トロイダルモード数 $n=6$ のベンチマークケース、ITERの安定性解析の結果が紹介された。安定性解析に複数イオン種を入れた効果が初めて報告された。紹介されたケースではヘリウム灰、Be等の混入により不安定性の減衰率が下がることが報告された。

非線形コードのベンチマーク活動では、前回までに整備された統一的手法にて、不安定性飽和過程での高速粒子の位相空間での振る舞いの解析が、新たにHAGIS、EUTERPEコードについて実施された。これまでにHMGC、MEGA、HAGIS、EUTERPEコードの飽和過程が同等に妥当であることが確認された。ベンチマーク活動の次の段階として、EPMのケースを扱うこととなり、HMGC、MEGAが取り扱ったことがあるJT-60Uの結果をベースにしたベンチマークケースを設定することとなった。

前回から始まったイオンサイクロトロン波が作り出す高速イオンのモデリングについてはGNETコードのLHD、Alcator C-Modへの適用例が紹介された。また、コード間のベンチマークの準備が進められていることが報告された。加えてDEMOを見据えたITER貢献のあり方についても議論を行った。

6. 「MHD 安定性」

第24回となる本会合は、高エネルギー粒子物理トピカルグループと平行して開催され、合同セッションも設けられた。参加者は、日本3名、欧州20名、米国5名、中国4名、インド2名、ロシア2名、ITER機構2名であった。会合では、国際装置間比較実験やワーキンググループ活動に関する報告が行われた。その中で、ディスラプションに関しては多くの時間が割り当てられ活発な議論が行われた。

ディスラプション関連では、3次元コードJOREKにおいて、大量ガス入射 (MGI) のシミュレーションが可能となり、JETやASDEX Upgradeの実験結果との比較が進められつつあるとの報告があった。ハロー電流のモデリングに関して、DIII-Dの真空容器等の減衰時定数を考慮して2次元コードTSCで計算を行い、概ね実験を再現したとの報告があった。逃走電子に関してFTUから、シンクロトロン放射損失を考慮し、さらに電子密度としてプラズマ中心部の値を用いることにより、逃走電子発生/抑制時の電場が計算値と実験値とでよりよく合うようになるとの報告、および逃走電子ビームの位置を実時間制御した報告があった。また、Alcator C-Modからは、逃走電子の偏光度をモーションナル・シュタルク効果偏光計で計測した初期結果が紹介された。また、不純物MGIおよびハロー電流に関するディスラプションデータベースの整理が一段落し、雑誌に投稿する準備が整ったとの報告があった。参加している装置は、Aditya、ASDEX Upgrade、Alcator C-Mod、DIII-D、JET、JT-60U、MAST、NSTX、TCVである。

新古典テアリングモード (NTM) に関しては、DIII-Dにおいて、実時間NTM安定化システムが、高ベータ実験やITER標準運転模擬実験などにおいてツールとして用いられていることが報告された。特に後者では、最初ポロイダルモード数 $m=3$ 、トロイダルモード数 $n=2$ のNTMの発生位置に電子サイクロトロン電流駆動の位置を合わせておき、 $m/n=2/1$ のNTMの発生を検知するとその位置に向けミラーを駆動した例が紹介された。また、FTUでは、特異値分解を使いNTMの強度を精度よく評価したことが以前報告されたが、今回はそれを実時間システムに組み込み、NTMを安定化した結果が報告された。

誤差磁場に関連しては、 $n=1$ の誤差磁場を評価する実験がEASTとKSTARで行われた結果、両装置で誤差磁場が非常に小さいことが報告された (主磁場強度の 10^{-5} 倍程度)。また、DIII-Dから、ITERを模擬した低トルク入力実験のもとでテストブランケットモジュールを模擬した誤差磁場を印加した時にはモードロックが発生するが、誤差磁場を補正することによりプラズマ回転が回復できたことが報告された。

現在、国際装置間実験が10件、ワーキンググループ活動が7件進行中である。本会合でその進捗について担当者から報告があり、いずれの研究課題も継続することになった。また、ハロー電流が多く流れるケース (電流クエンチ時間が長いケース) を精査するワーキンググループ活動を開始するか今後検討することになった。