



■ITPA (国際トカマク物理活動) 会合報告(20)

- 分野：「輸送物理」¹，「閉じ込めデータベースとモデリング」²，「周辺およびペDESTALの物理」³，「MHD」⁴
- 開催日：2007年10月1日～3日^{1,2,3}，2007年10月10日～12日⁴
- 場所：那珂（日本）^{1,2,3}，ガルヒン（ドイツ）⁴，
- 担当委員：藤田隆明（原子力機構）¹，福田武司（阪大）¹，福山 淳（京大）¹，坂本宜照（原子力機構）¹，東井和夫（核融合研）¹，小川雄一（東大）²，竹永秀信（原子力機構）²，滝塚知典（原子力機構）²，矢木雅敏（九大）²，山田弘司（核融合研）²，鎌田 裕（原子力機構）³，大山直幸（原子力機構）³，浦野 創（原子力機構）³，中嶋洋輔（筑波大学）³，居田克己（核融合研）³，大藪修義（核融合研）³，飯尾俊二（東工大）⁴，諫山明彦（原子力機構）⁴，篠原孝司（原子力機構）⁴，小野 靖（東大）⁴，中島徳嘉（核融合研）⁴，（下線は当該グループの会合への出席者を，1から4の上付き数字はグループとの対応を示す）

2007年の秋季に，ITPAに関する上記4つの会合が開催された。日本からの参加者は14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 |
|------------------|----------|------------|
| 輸送物理 | 4/21～25 | オークリッジ(米国) |
| 閉じ込めデータベースとモデリング | 4/21～25 | オークリッジ(米国) |
| 周辺及びペDESTALの物理 | 4/30～5/2 | GA(米国) |
| MHD | 2/25～29 | 原子力機構，那珂研 |

1. 「輸送物理」

本会合（第13回）は，「閉じ込めデータベースとモデリング」および「周辺及びペDESTALの物理」トピカルグループとの合同セッションを行いつつ，主にプラズマ回転と運動量輸送，装置間比較実験，最近の研究成果等について報告・議論が行われた。会合には，日本，欧州，米国，ロシア，中国，韓国から約25名（日本から6名）が出席した。

プラズマ回転と運動量輸送は，本トピカルグループの重要課題と位置付けられており，多くの時間が割り当てられた。近年のプラズマ回転に関する研究は，JT-60のフェライト鋼によるリップル低減実験や接線中性粒子ビームを用いたトロイダルトルクスキャン実験，JETのリップルスキャン実験，DIII-DのCTRビーム設置等により，活発に議論されるようになった。特に，ITERでは現有装置よりも運動量入力相対的に小さくなるため，輸送障壁形成や抵抗性壁モード安定化に必要なトロイダル回転を生成しかつ制御できるかが議論の中心となっている。3つのトピカル

グループが合同で行った運動量輸送セッションは，鎌田（原子力機構）がセッションの編成と座長を担当し，運動量輸送研究の最近の進展とITERへの予測について議論を行った。吉田（原子力機構）は，高速イオン損失に起因する周辺部に局在して駆動されるトロイダル回転の変調実験により，運動量ピンチ項の評価と自発回転と圧力勾配との関係について報告した。JETからは，様々な運転シナリオにおけるトロイダル回転のデータベースをもとにマッハ数のスケーリングを導出し，安全係数に反比例し密度に対しては負の依存性があると報告があった。坂本（原子力機構）は，ITERの定常運転シナリオにおいて中性粒子ビームエネルギーやプラズマ密度を変えたときの運動量入力の計算結果について報告し，ビームエネルギー低減に伴い運動量入射量は増大するがプラズマ周辺部にデポジットするため補足粒子割合が増大してしまい，運動量入力量としてはあまり増大しないことを示した。その他に，トロイダル回転のHモード遷移閾パワーや閉じ込め特性への影響，微視的不安定性の運動量輸送への影響等が議論された。

装置間比較実験のセッションでは，進展状況と今後の予定について議論が行われた。「低トルク入力の輸送に対する効果」では，JETのICRHを用いた負磁気シアプラズマにおいてトロイダル回転シアが十分小さい場合にもイオン温度の内部輸送障壁が形成されているとの報告があった。「自発回転の比較実験」では，今後の計画として，リップルやペDESTAL圧力の効果を調べるとともに，データベースにJT-60とDIII-Dのバランス入射のデータを加えて高ベータ領域へ拡張することになった。全体で14件の報告があったが，主要装置の運転が休止中のため，装置間比較実験の進展が限られていたのは残念であった。

最近の研究話題として，NSTXプラズマにおけるETG乱流のシミュレーション結果，電子輸送に関するPaleo-classical理論，JETにおけるリップルの内部輸送障壁への影響等の報告が行われた。

2. 「閉じ込めデータベースとモデリング」

「輸送物理」，「周辺およびペDESTALの物理」トピカルグループ（TG）会合と同時開催された本会合（第13回）には67名（日本24名，米国17名，欧州15名，ロシア3名，中国2名，韓国2名，ITER機構4名）が参加した。初日の3TG合同セッションでは，運動量輸送およびプラズマ回転に関する議論がなされた。続く，当TG総合セッションでは，装置間比較実験の現状と今後の計画が報告された。閉じ込め性能のベータ値依存性について，DIII-Dでの実験結果が報告された。DIII-Dでは，ASDEX-Uに近い配位，DIII-Dの通常配位でトロイダル回転速度が大きい場合と小さい場合において，閉じ込め性能のベータ値依存性が調べられた。その結果，いずれの場合でもベータ値が高い方が閉

じ込め性能が低いことが観測された。これまで、DIII-Dでは高ベータでも閉じ込め性能は劣化しないと主張してきた。以前との違いについて、今回は高ベータ領域にデータが限られていることが指摘された。総合セッション後は、主に3作業グループ(WG)；全体的閉じ込めWG/粒子輸送WG/統合モデリングWGのセッションが行われた。全体的閉じ込めWGでは、Hモード閉じ込めデータベースに関して、トロイダル回転速度のデータベース化について議論された。また、LモードからHモードへの遷移加熱パワーしきい値に関して、加熱パワーが最小となる密度、回転の影響、タイプIIIからタイプIELMへの遷移パワーしきい値およびHモードからLモードへの逆遷移のヒステリシス性について議論がなされた。粒子輸送WGでは、密度分布の尖塔度に関する議論が行なわれた。低アスペクト比装置NSTX及びMASTでも、ASDEX-U、JETと同様に衝突周波数が小さいほど密度分布が尖塔化することが報告された。JT-60Uでも衝突周波数の減少とともに電子密度分布の尖塔度が大きくなるが、炭素密度は電子密度より平坦で衝突周波数依存性が見られないことを竹永(原子力機構)が報告した。また、密度分布を決定する物理機構を解明するためのドリフト波乱流輸送に基づいたモデリングの初期結果について報告がなされた。統合モデリングWGでは、まずITER機構のHoulbergが9月にCadaracheで行なわれたITER統合モデリング会議(日本から福山(京大)が参加)の内容について報告した。続いて行われた各極からの現状報告では、矢木(九大)が「日本の統合モデリング活動の現状」について報告し、日欧Broader Approach(BA)も考慮した研究計画について示した。EU側からもBAを考慮した計画が示され、今後の共同研究の進展が期待される。各極では、コードインターフェースにおけるデータ構造の構築およびコードを統合化し実行するためのワークフローの開発を進めている。共同研究を行うためのデータ構造の共通化及びそれを利用したコードの動作確認・妥当性検証について議論を行った。またITERモデリングWGでは、ITER設計レビューのために行った運転シナリオのトロイダル磁場等のパラメータ依存性調査について各極から主に報告された。林(原子力機構)は、1.5次元輸送コードTOPICSを用いた調査結果を報告し、他極の結果との違いについて議論した。依存性は定性的には概ね一致している。

3. 「周辺およびペデスタルの物理」

本会合には20名(欧州7名、米国7名、日本6名)の参加者があり、ITER設計レビューにおける重要課題の一つである「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、トロイダル回転やトロイダル磁場リップルの周辺ペデスタルへの影響に関する議論、国際装置間比較実験(14件)の現状報告と2008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。

本会合初日では、「輸送物理」と「閉じ込めデータベースとモデリング」トピカルグループとの合同セッションがプ

ラズマ回転とITERにおける課題を中心に開催され、当トピカルグループからは、DIII-D装置(米)において、逆方向トロイダル回転の増加とともにLH遷移パワーが減少することが報告され、また、JT-60装置(日)からHモードのコアプラズマの熱輸送および周辺プラズマの構造形成に対するトロイダル回転の影響を定量的に示した結果が浦野(原子力機構)から報告された。

ITERの標準運転シナリオとして考えている従来のHモードでは、プラズマの周辺部に輸送障壁が形成され高い閉じ込め性能が得られるが、一方でプラズマ境界近傍に局在する不安定性ELMがダイバータ板などのプラズマ対向材料に与えるパルス的な熱負荷が課題となっている。ITERでは、ELMによる放出エネルギーをペデスタル部の蓄積エネルギーの1%以下に低減させる必要があることが報告され、その制御手法の可能性について議論された。また、本会合においては、このELMによる熱負荷を低減させるための能動的な手法であるエルゴディック磁場生成について、DIII-D装置から、専用の外部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を極小化する実験の進展等が報告された。ELMやペデスタル構造に関する磁場リップルの効果について、JT-60装置及びJET装置(英)における実験結果やITERにおけるフェライト鋼の効果が報告され、活発な議論が行われた。

「閉じ込めとデータベースとモデリング」トピカルグループとの合同セッションでは、Hモードの周辺プラズマ圧力が高ボロイダルベータ化に伴う磁気軸シフト量の増加によって増大することがJT-60装置やDIII-D装置で観測されているが、磁気軸シフト量の増加が周辺ピーリング・バルーニングモードを安定化させることをELITEコードによって示した結果が報告された。また、周辺輸送障壁幅の最近の実験結果に基づくモデリングについて活発な議論が行われた。JT-60装置からは、軽水素と重水素プラズマを比較する実験によって、周辺輸送障壁幅はジャイロ半径に対する依存性が弱いことを示した実験結果が報告された。

4. 「MHD」

本会合は、第10回となる。出席者は委員・専門家を含め約60名であった。そのうち日本側からの出席者は8名であった。3日間の会合では45件を超える発表があり、高速イオン起因不安定性、抵抗性壁モード(RWM)、新古典テアリングモード(NTM)、垂直位置不安定性、ディスラプションなどに関する実験・理論解析結果および装置間比較研究に関する発表が行われた。

高速イオン起因不安定性関連については、本会議に先んじてドイツのゼーオンで「第10回磁気閉じ込め系における高速粒子に関するIAEA技術会合」が開催されたこともあり、本分野の委員・専門家が多数参加し、2日目の多くの時間が本分野のトピックに関するものであった。高速イオン起因不安定性のITERでの予測については、ハイブリッド運転での負イオン源中性粒子ビームによるEPMというタイプの高速イオン起因不安定性の可能性が指摘された。EPMはしばしば突発的な高速イオンの輸送を引き起こす

ため、運転上問題になる可能性がある。このため、負イオン源中性粒子ビームのエネルギーを 500 keV にすることを提案する発表者もいた。計測については最近の研究の進展と新規計測器の実証を反映した ITER の計測器の要望リストが作成された。また、日本より、ITER に設置される強磁性体 (FI) の量について、高速イオン閉じ込めの観点から発表し、5.3 T という標準運転領域で磁場の最適化をしすぎると 2.65 T などの低磁場で性能向上が期待できないことを指摘した。

RWM に関しては、DIII-D および NSTX より最新の実験報告があった。特に DIII-D からは、低プラズマ回転での RWM 安定化に $E \times B$ ドリフト速度が重要である可能性が示された。ASDEX-U では、ELM および RWM 制御のためのコイル、RWM 安定化の導体壁の導入計画が示された。

NTM の安定化に関連して、電子サイクロトロン電流駆動のシミュレーション結果に関する報告が日本側よりあった。従来は磁気島の磁場構造を正しく考慮した解析が不可能であったが、これを可能にしたこと、このシミュレ-

ーションで得られた電流駆動効率が従来の解析結果より高くなること、およびその物理機構を示した。

垂直不安定性に関しては、ITER の立ち上げ/立ち下げ時の安定性に関する解析結果の報告があり、垂直磁場コイルの容量向上またはコイル追加により安定性が大きく改善されるとの報告があった。また、垂直移動現象 (VDE) に関して DINA や TSC によるシミュレーションの結果が報告された。このほか、過去に JET でディスラプション時に観測された sideways force に関する議論があり、DIII-D や ASDEX-U ではディスラプション時の真空容器の水平方向の移動量はほとんどないとの報告があった。

会合最終日には、RWM, NTM, 高速イオン起因不安定性等に関する国際装置間比較実験 (MDC-1~12) の現状報告と今後の進め方について議論が行われた。MDC-10 については JT-60U が新たにセンシングアンテナを設置したことから、JT-60U が加わることとなった。また、垂直位置不安定性に関する共同実験の提案があった。

(2007年12月13日原稿受付)