



した結果、要求精度5 mmを満足する3 mm以下の位置決め精度を再現性良く実現することができた。今後、高精度ハンドリングの信頼性を高めるためにキー挿入時の「かじり」を抑制する力制御の性能試験を行う予定であり、本保守口

ポットの製作仕様の確定に向けて準備を着実に進めているところである。

(日本原子力研究開発機構核融合研究開発部門)

## ■ITPA (国際トカマク物理活動) 会合報告(22)

●分野：「閉じ込めデータベースとモデリング」<sup>1</sup>，「輸送物理」<sup>2</sup>，「MHD」<sup>3</sup>，「周辺およびペDESTALの物理」<sup>4</sup>，「定常運転」<sup>5</sup>

●開催日：2008年4月22日～25日<sup>1,2</sup>，2月25日～29日<sup>3</sup>，4月30日～5月2日<sup>4</sup>，4月14日～4月17日<sup>5</sup>

●場所：オークリッジ国立研究所 (米国，オークリッジ)<sup>1-2</sup>，日本原子力研究開発機構 (日本，那珂)，ジェネラルアトミックス社 (米国，サンディエゴ)<sup>4</sup>，マサチューセッツ工科大学 (米国，ケンブリッジ)<sup>5</sup>

●担当委員：竹永秀信 (原子力機構)<sup>1</sup>，小川雄一 (東大)<sup>1</sup>，滝塚典典 (原子力機構)<sup>1</sup>，矢木雅敏 (九大)<sup>1</sup>，山田弘司 (核融合研)<sup>1</sup>，坂本宜照 (原子力機構)<sup>2</sup>，東井和夫 (核融合研)<sup>2</sup>，福田武司 (阪大)<sup>2</sup>，福山淳 (京大)<sup>2,5</sup>，藤田隆明 (原子力機構)<sup>2</sup>，篠原孝司<sup>3</sup>，諫山明彦<sup>3</sup>，小野靖<sup>3</sup>，中島洋輔<sup>3</sup>，飯尾俊二<sup>3</sup>，居田克巳 (核融合研)<sup>4</sup>，浦野創 (原子力機構)<sup>4</sup>，大山直幸 (原子力機構)<sup>4</sup>，鎌田裕 (原子力機構)<sup>4</sup>，大藪修義 (核融合研)<sup>4</sup>，杉原正芳 (ITER 国際チーム)<sup>4</sup>，中嶋洋輔 (筑波大)<sup>4</sup>，井手俊介 (原子力機構)<sup>5</sup>，及川聡洋 (ITER 国際チーム)<sup>5</sup>，鈴木隆博 (原子力機構)<sup>5</sup>，高瀬雄一 (東大)<sup>5</sup>，中村幸男 (核融合研)<sup>5</sup>，花田和明 (九大)<sup>5</sup> (下線は会合出席者を，1 から 5 の上付き数字はグループとの対応を示す)

2008年の春季に，ITPAに関する上記5つの会合が開催された。「閉じ込めデータベースとモデリング」と「輸送物理」の2会合は，オークリッジ国立研究所でおこなわれ，グループ間の合同会合も多数開かれた。「MHD」の会合は日本原子力研究開発機構の那珂核融合研究所で開催され，日本側参加者は30名を超えた。「周辺およびペDESTALの物理」の会合は，サンディエゴのジェネラルアトミックス社で行われた。「定常運転」の会合は，ケンブリッジのマサチューセッツ工科大学で行われた。

次回会合は，「輸送物理」「閉じ込めデータベースとモデ

リング」と「周辺およびペDESTALの物理」が合同でイタリアのミラノにて，「MHD」と「定常運転」が合同でスイスのローザンヌにて，いずれも2008年10月20-22日に開催される予定である。

### 1. 「閉じ込めデータベースとモデリング」および「輸送物理」

本会合 (第14回) は，「閉じ込めデータベースとモデリング」および「輸送物理」トピカル物理グループの合同会合として開催された。会合には，28名 (米国：13名，欧州：9名，日本：3名，ITER：3名) が出席した。主に ITER 研究計画における輸送関係の課題や国際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，閉じ込めへの粒子種依存性，ITER プラズマモデリング，プラズマ回転と運動量輸送，等についてセッションを設けて議論を行った。

ITER の軽水素実験フェーズでは加熱パワーが少なく，H モードプラズマを得ることが難しいとされるため，軽水素プラズマよりも L-H 遷移閾パワーが小さいヘリウムプラズマで H モード研究を行うことが ITER 研究計画において検討されている。これまでの各装置における L-H 遷移しきいパワーや閉じ込め特性のイオン種依存性について議論が行われた。ヘリウムプラズマの L-H 遷移閾パワーは，重水素プラズマの～1.4倍，軽水素プラズマの0.75倍と報告された。一方，ヘリウムプラズマの閉じ込め性能については，軽水素と同レベルで，重水素の0.7倍程度であると報告された。今後，各装置で L-H 遷移閾パワーのイオン種依存性，密度依存性，トルク入力の影響等を詳細に調べる実験を行い，データベースを拡充することになった。

国際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。「自発的トロイダル回転」では，TEXTOR の ICRH 入射実験や Alcator C-Mod の LH 入射実験において，プラズマ電流と逆方向の CTR 回転が生成されるとの報告があった。これらは，これまでデータ

ベースを構築してきた自発回転とは向きが逆であり、物理機構の解明が望まれる。「低衝突周波数領域での密度分布」では、ヘリウムプラズマも重水素プラズマと同様な電子密度分布を持つことが報告された。全体で15件の報告が行われたが、前回の会合からの進展が限られていたのは残念であった。

プラズマ回転と運動量輸送のセッションでは、輸送モデルを用いたトロイダル回転分布のシミュレーション結果やプラズマ閉じ込めへの影響について報告や議論が行われた。竹永(原子力機構)は、JT-60UのELMy Hモードプラズマにおけるプラズマ回転と熱輸送との関係について報告し、CO方向のプラズマ回転の場合に、イオン温度の規格化勾配の増加ではなく周辺ペデスタルのイオン温度が高くなっていることが、エネルギー閉じ込め改善度の増大に寄与していることを示した。

ITERモデリングセッションでは、ITERプラズマの予測のために、日本・米国・欧州で開発が進められている統合コードの現状等が報告された。林(原子力機構)は、原子力機構で開発している統合コードTOPICS-IBを用いたトロイダル磁場低減のプラズマ性能への影響評価とハイブリッドおよび定常運転シナリオのベンチマーク計算結果について報告した。定常運転シナリオのシミュレーションでは、内部輸送障壁で熱的不安定性が起きており、同様の不安定性は欧州の統合コードCRONOSの結果でも報告され、加熱・電流駆動のフィードバック制御の必要性について議論した。

内部輸送障壁に関するセッションでは、坂本(原子力機構)が、JT-60U負磁気シアプラズマにおける内部輸送障壁のダイナミクスについて報告した。核融合研と共同で開発したモジュレーションCXRSを用いて測定したイオン温度やトロイダル回転の詳細分布の時間発展を示し、特に内部輸送障壁遷移後のイオン温度分布の変化について、イオン温度勾配がほとんど変わらずに急峻なイオン温度勾配領域が拡大することを報告した。

今後2年間の優先研究課題について議論を行い、(1)LH遷移閾値の各種物理量依存性、(2)粒子と不純物の輸送、(3)電子系の熱輸送、(4)イオン系の熱輸送、(5)輸送モデルの検証、(6)運動量輸送とプラズマ回転、に関してそれぞれ優先研究課題を設定した。今後、両グループは統合され、「閉じ込めと輸送」トピカル物理グループとして活動を行う予定である。

## 2. 「MHD」

第11回となる本会合は、「ELMとRWMの制御に関するIEA大型トカマクワークショップ」、「燃焼プラズマにおけるMHD挙動と制御に関する日米ワークショップ」と合同で開催された。出席者は委員・専門家を含め約60名であった。5日間の会合では約60件の発表があり、ELM、RWM、NTM、高速イオン起因不安定性、垂直不安定性、ディスラプションなどに関する発表があった。また、ヘリカルやRFPなど、トカマク以外の装置からも多くの発表があった。

RWMに関しては、自由境界理想 $\beta$ 限界を超える領域での結果についてJT-60U、DIII-D、JETより報告があった。この領域において維持時間や到達 $\beta$ 値を制限しているRWMやNTMに関して、NTMによりRWMが引き起こされる例、およびその逆の例の報告があった。ASDEX Upgradeからは抵抗壁やフィードバックコイルのMHD安定性に対する影響について3次元数値計算の結果が報告された。RWMやELMに関しては、各々の物理特性に関する発表に加え、共鳴磁場摂動(RMP)コイルを用いた能動的な制御に関する発表も多くあり、ITERにおけるRMPコイルとして、ブランケットと真空容器の間にコイルを設置した場合がELMの制御性がよいという報告があった。

垂直不安定性(VS)に関連しては、ITERの現在の設計における垂直変動の許容値や、VS制御コイルの電流の増強による垂直変動の裕度の改善に関する発表があった。また、ディスラプション時に発生する横方向および垂直方向の力に関して、モデルと実験(JET、DIII-D)との比較に関する発表があった。

NTMに関しては、 $m/n = 2/1$ のNTMを完全に安定化するために必要な電子サイクロトロン(EC)駆動電流量に関する実験およびシミュレーションの結果がJT-60Uよりあった。また、TOTALコードによるNTM(およびペレット、ITB)のシミュレーション、ドリフト波とNTMとの相互作用、プラズマ回転とNTM安定性との関係に関する報告があった。また、ITERにおけるEC波の変調周波数に関する発表があり、本会合での議論の結果、本トピカルグループからは5kHz程度の変調能力を要求することになった。

高速イオン起因不安定性については、LHD、CHS、DIII-D、NSTXから報告があった。LHDからは、ITER用に開発したセラミックシンチレータを使用した損失イオンプローブの詳細仕様、およびそれを用いたTAE周波数帯バーストモードによる高速イオンの輸送に関する報告があった。CHSからは、両方向ラングミュアプローブ計測法の開発、およびこれによる高速イオンの挙動の高時間分解計測( $\sim 10 \mu\text{s}$ )に関する報告があった。DIII-Dからは、負磁気シアAE不安定性による高速イオン分布の平坦化の物理機構に関する報告があった。NSTXでは理論グループによる解析が進んでいて、その結果の1つとして、NSTXではビーム駆動電流が小さいためにAE不安定性による影響は小さいという報告があった。

## 3. 「周辺及びペデスタルの物理」

本会合(第14回)には遠隔参加も含めて約23名(日本、米国、欧州、ITER国際チーム)の参加者があり、国際装置間比較実験、周辺ペデスタル構造、ELM制御手法、統合モデリングコード開発および小振幅ELM研究等のトピックを中心に発表・議論を行った。

国際装置間比較実験の現状と今後の予定についての議論では、ITERにおけるELM熱負荷の課題を克服するためにもJT-60Uを用いた国際装置間比較実験の進展に向けた期待が示された。特に、接線入射NBIの組み合わせを変える

ことでトロイダル回転分布を変化することができる JT-60U と DIII-D における装置間比較実験に向け、プラズマの回転がペDESTAL性能や ELM 特性に与える影響に関する JT-60U のこれまでの実験結果のサマリーは注目を集めた。

ペDESTAL構造形成に関しては、ポロイダルベータ値と規格化ポロイダルラーマ半径の結合を解くため、質量の違う重水素プラズマと軽水素プラズマでの比較実験を行った JT-60U の研究成果が報告された。イオン温度ペDESTALの幅は規格化ポロイダルラーマ半径の 0.2 乗、ポロイダルベータ値の 0.5 乗に比例するという経験則が示された。ポロイダルベータ値の依存性は DIII-D と同じ傾向を示しており、ITER のペDESTAL幅予測精度向上に向けた比較研究の進展が期待される。

ITER における ELM 低減・制御手法確立に向けた議論では、ITER で想定している ELM 制御用ペレット入射装置だけでなく、ELM 制御コイルや小振幅 ELM 運転の確立に向けた R&D 活動を積極的に推進していくべきであるとの共通認識を得た。MAST, ASDEX Upgrade, DIII-D では ELM 制御コイルの設置を、DIII-D, JET, ASDEX Upgrade では ELM 制御用ペレット入射装置の設置を、それぞれ進めていることが報告された。JT-60U では ITER プラズマ適用可能な小振幅 ELM である grassy ELM が得られており、運転領域の拡大や小振幅 ELM 発生の物理機構理解を通じた ELM 低減への貢献が期待されている。

#### 4. 「定常運転」

本会合 (第13回) には22名 (日本: 2名, 米国: 約10名, 欧州: 5名, 韓国: 1名, ITER 機構: 4名) が参加し、主に(1)国際装置間比較実験の進展の報告と計画の立案, (2) ITER 運転シナリオのモデル化とベンチマークに関する議論, (3)加熱・電流駆動源のモデル化とベンチマークおよび電流駆動 (CD) 実験についての議論を行った。さらに第21回 IAEA 核融合エネルギー会議へ投稿するグループ論文について討論を行った。以下に概略を示す。

(1)ITER 定常運転シナリオ (国際装置間比較実験 SSO-1) について、DIII-D からはプラズマ形状を最適化することで規格化 $\beta$ 値を3.3から3.5に上げて1.8-2秒程度維持した成果

が報告された。JT-60U からは低域混成 (LH) 波および中性粒子ビーム (NB) による電流駆動と自発電流を組み合わせることで安全係数最小値 $>2$ の弱磁気シアプラズマを完全非誘導電流駆動状態で維持し電流分布の緩和した状態を実現した成果が報告された。さらに JT-60U では導体壁との距離の近い大体積プラズマにおいて、壁無し MHD 安定性限界を超えた規格化 $\beta$ 値2.8を2秒間程度維持した成果や、90%程度という高い自発電流割合を有する高閉じ込め負磁気シアプラズマの運転領域を低い安全係数 $q_{95}\sim 5.3$ 領域にまで拡大した成果について報告があった。ITER ハイブリッド運転シナリオ (SSO-2) については JT-60U から高規格化ベータ値2.6を28秒間維持した成果の報告があった。DIII-D からはプラズマ回転や電子イオン温度比などがプラズマ性能へ及ぼす影響を ITER と相似の配位で系統的に調べるための実験の初期結果について報告があった。ITER 立ち上げシナリオ (SSO-5) に関しては、大体積での電流立ち上げ実験における Alcator C-Mod, ASDEX Upgrade, DIII-D, JET 装置間のプラズマパラメータ (特に立ち上げ中の電流分布) の比較が報告され、核融合エネルギー会議への論文化を進めていくことになった。JT-60U からは ECRF を入射することで壁が飽和しているような条件下でも安定なプラズマ着火および立ち下げが得られるという実験結果について報告があった。NBCD 電流駆動 (SSO-6) については DIII-D から NBCD 分布計測に関する初期結果、JT-60U からは2008年5月に予定されている実験の計画についての報告があった。(2)ITER ハイブリッド運転シナリオに関して ASTRA, CRONOS, TOPICS, TSC コード間のベンチマークの報告があり、ヘリウム輸送に関する相違はあるが概ね良い一致を得ている。(3)NBCD に関して、軌道追跡コード (OFMC, NEMO-SPOT), Fokker-Planck コード (ACCOMME, ASTRA) 相互間のベンチマーク結果の報告があり、各コードでのモデル化手法の違いの比較検討がされた。ITER での NB 加熱電流分布予測計算と合わせて核融合エネルギー会議への論文化を進めていくことになった。

(2008年6月6日 原稿受付)