



■会議報告

第33回欧州物理学会 (EPS) プラズマ物理年次大会

竹永秀信 (原子力機構)

久保 伸 (核融合研)

井戸村泰宏 (原子力機構)

城崎知至 (阪大レーザー研)

2006年6月19日から23日まで、ローマ(イタリア)の Angelicum, Pontificia Università San Tommaso d'Aquino にて第33回欧州物理学会 (EPS) のプラズマ物理年次大会が開催された。会場は古代ローマ民主政治の中心地であったフォロ・ロマーノや「それがあつた限りローマも存在するだろう」と言われたコロッセオの近くに位置しており、古代から現代までの科学・技術発展の縮図をみる思いであった。ちなみに、フォロ・ロマーノのフォロは「フォーラム」の語源であり、当時の政治手法は、核融合エネルギーの実現に向けた研究・技術開発の促進を支援することを目的として設立された「核融合フォーラム」に通じるものがある。

会議は、池田 ITER 機構長予定者のスピーチならびに今年の Alfvén 賞を受賞した P. H. Rebut の受賞講演で始まった。日々の会議構成の概略は、3件のプレナリー招待講演、その後各セッションに分かれての招待講演、一般口頭発表、ポスター発表である。セッションは Magnetic Confinement Fusion (MCF), Beam Plasmas and Inertial Fusion (BPIF), Dusty and Low Temperature Plasmas (DLTP), Basic Plasmas and Space and Astrophysical Plasmas (BPSAP) の4つからなり、15件のプレナリー招待講演と MCF 495 (41) 件, BPIF 167 (35) 件, DLTP 128 (27) 件, BPSAP 109 (26) 件の発表があつた(カッコ内は招待講演と一般口頭発表の合計件数)。口頭発表セッションは室内で5日間、ポスターセッションは中庭を取り囲む回廊で水曜を除く4日間行われた。水曜の午後は、エクスカーションに参加して炎天下古代ローマ時代の別荘地であつたチボリを歩きまわつたり、「ローマの半休日」を過ごしたり、各々ローマを満喫した。前回の EPS では、会議中に ITER サイト決定のニュースを受け急遽 ITER セッションが開催されたが、今回は火曜の夕方に予定されていゝた ITER セッションは急遽中止された(経緯は不明)。参加者は、欧州をはじめ日米中韓等から600名を超えた。日本からの参加者は60名程度であつた。次回の EPS はポーランドのワルシャワで開催される。

磁場閉じ込め核融合の実験・解析関連では、JET, ASDEX-U, DIII-D 等の欧米主要トカマク装置の実験が少なかつたこともあり、全体的にはプラズマ性能向上より実験結果解析に関する発表が多かつた。その中で、JT-60U からは2005年度に設置したフェライト鋼タイルによるプラズマ性能向上に関する発表がなされ、多くの関心を集めた。大山(原子力機構)からは、フェライト鋼設置による

トロイダル磁場リップル低減と高ベータプラズマの長時間維持に関する報告があつた。中性粒子ビームの損失低減による実効的な加熱パワーの増加とトロイダル回転の変化により、規格化ベータ値 (β_N) が2.3以上で、かつ ELMy Hモードプラズマでのスケーリング則程度の閉じ込め性能を持つ高性能プラズマを、電流拡散時間の12倍程度に相当する23.1秒間維持したことが報告された。また、松永(原子力機構)からは、抵抗性壁モードのプラズマ回転による安定化効果に関する報告があつた。吉田(原子力機構)からは、フェライト鋼設置によるトロイダル磁場リップルの減少で、垂直中性粒子ビームにより入射された高速イオンの損失が低減し、それにより駆動されていゝたプラズマ周辺部でのプラズマ電流と逆方向へのトロイダル回転が減少したことが報告された。トロイダル回転を決める物理機構は、国際トカマク物理活動 (ITPA) でもワーキンググループを立ち上げて集中的に議論を行つていゝるところである。トロイダル回転に関しては、DIII-D からも報告があつた。DIII-D では、順方向入射 NB の一部を逆方向入射へと変更し実験を開始したが、そこでのトロイダル回転の制御性に関する検討結果について報告がなされた。

実験結果解析に関しては、粒子・不純物輸送解析に関する発表が多く見られた。特に、これまで熱輸送に適用されていゝた乱流輸送モデルが、粒子輸送にまで適用され始めている。密度分布に関する乱流輸送の影響について幾つか報告があり、ASDEX-U や JET の ELMy Hモードプラズマでは、イオン温度勾配モード (ITG) や捕捉電子モード (TEM) の成長率の指標である実効的衝突周波数(電子-イオン間衝突周波数と湾曲ドリフト周波数の比)が小さいほど密度分布がピークする傾向にあることが報告された。一方で、TCV では密度分布の実効的衝突周波数への依存性は見られないとの報告もあり、今後さらに解析を進め統一的な理解を得る必要がある。密度分布の実効的衝突周波数依存性は、ITPA において装置間比較実験を行つており、今後の研究の発展が期待される。その他の ITPA 装置間比較実験関係では、ASDEX-U から閉じ込め性能のベータ依存性に関する報告がなされた。これまで、JET, DIII-D ではスケーリング則に反して閉じ込め特性のベータによる劣化はないと主張してきたが、JT-60U ではベータによる劣化が観測されていゝる。今回 ASDEX-U でもベータによる閉じ込め性能の劣化が観測され、実験条件の違いを考慮して今後さらに解析を進め統一的な理解を得る必要がある。

将来の核融合炉では、トリチウムリテンションの問題から金属壁の使用が考えられており、金属壁に関する報告も多く見られた。C-MOD からは、モリブデンを全プラズマ対向材に使用した時のポロナイゼーション効果に関する報告がなされた。ポロナイゼーションを行つていゝない場合は、モリブデンの混入により放射損失が大きく閉じ込め性能が低いことが報告された。ASDEX-U では、ICRF 加熱アンテナのガードリミターもタングステンコーティングし実験を行つていゝるが、ICRF 電力印可もしくは ELM 時に ICRF 加熱アンテナのタングステンスパッタリング率が大きく上昇することが報告された。この様に、金属壁での運転には

制約条件がつくことが考えられるが、ASDEX-Uではさらにダイバータ板もタングステンに変更する計画が進行中である。さらに、JETでもタングステンドイバータへの変更が予定されている。金属壁と高性能プラズマの両立性は今後の大きな課題である。また、興味ある結果として、高ベータ化に関するDIII-DとNSTXの結果を記述しておく。DIII-Dからは、内部コイルにより抵抗性壁モード(RWM)を抑制し壁無しのMHD理想限界より50%程度高い $\beta_N \sim 4$ を2秒間維持した報告があった。NSTXでは、 $\beta_N \sim 4-6$, $H_{89} \sim 2$, 非誘導電流駆動割合 >0.6 を0.5秒間維持することに成功した。その他、TEXTORからはDynamic Ergodic Divertor (DED)を用いたMHD研究の報告がなされた。さらに、中国(HL-2A)や韓国(KSTAR)からの発表件数が増加していることは、特筆に値する。

一方、ヘリカル系では、大藪(核融合研)からLHDにおけるベレット入射とローカルアイランドダイバータを組み合わせることにより得られたSuper Dense Core (SDC)プラズマの報告がなされた。同プラズマでは、 $\rho \sim 0.6$ 近傍にInternal Diffusion Barrier (IDB)と呼ばれる密度勾配が大きい領域が形成され、中心電子密度は $4.5 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ に達している。ヘリカル系において核融合炉条件を実現するための新たな運転領域として、多くの研究者の興味を引いた。また、小型のトルサトロンTJ-Kにおいて、核融合炉の周辺領域と次元的に相似な低温プラズマを生成して乱流輸送の詳細な実験結果と理論の比較が行われ、特にドリフト波乱流の密度揺動ではカスケードが、電位揺動では逆カスケードが起こっている実験的な証拠を得たとのインパクトのある報告がStroth (IPF Stuttgart)からなされた。この他、ポスター発表では、LHD, TJ-IIから約10件ずつ、閉じ込め改善と運転領域の拡大に関する報告がなされた。特に、熊沢(核融合研)によるLHDでの全加熱入力エネルギーが1.6 GJの世界記録を樹立した定常実験結果が注目を集めていた。LHDからは、この他にも、低次トロイダルモード数のMHD不安定性に対する磁気シアと有理面の影響(榊原), CO_2 レーザの2次元位相コントラスト法を用いて、密度揺動の実空間、波数空間構造を明らかにし、その密度揺動と粒子輸送との関連の議論(Michel), 電子サイクロトロン加熱のリップルトップとボトムの局所加熱による粒子束の増大と電子温度勾配の増大による粒子輸送の増大の分離(久保), TESPELにより周辺冷却を行った時に観測される中心部の非局所応答から明らかになった動的輸送特性(稲垣), 連続ペレットを用いた高性能プラズマの長時間維持(坂本), 6 MVのHIBPシステムとその初期結果(井戸), CHSからは最近発見された周辺輸送障壁(ETB)プラズマのAXUVによる輻射損失分布の観測(鈴木), ETBとITBの形成に関する電位揺動計測, ゴーナルフローとの関連(岡村)について発表が行われた。TJ-IIでは、PPPLとの国際協力で、高速・高分解能カメラで周辺プラズマにおける $H\alpha$ フィラメントの乱流構造を観測し、HIBP電位測定結果との定性的な一致を得ている。また、電極バイアス放電で周辺プラズマのシア流の増大に伴い、それが大きく(長細く)なるとの結果が報告された。さらに、ECHプラズマに

おけるe-ITBと $E \times B$ シアフローや有理面との関係に関する興味ある実験結果の報告と議論が展開されていた。Wendelsteinグループからは約10件の発表があったが、実験結果についてはW7-ASの高密度H-mode (HDH)とアルヴェンモードの解析に関する2件のみで、建設中のW7-Xのための解析コードに関する発表がほとんどであった。全体的には、例年よりもヘリカル系の発表が少ない印象を受けた。

磁場閉じ込め核融合の理論関連の発表としては、3件の招待講演があった。これらの講演に共通していたのはゾーンアルフローによる乱流輸送抑制に関するトピックが含まれていたことであった。Zonca (Frascati)の招待講演は高エネルギー粒子モードから乱流輸送まで網羅したレビュー的な講演であった。この中で、最近のGAM(Geodesic Acoustic Mode)と呼ばれる振動するゾーンアルフローの研究が取り上げられており、宮戸(原子力機構)がランダウ流体シミュレーションで示したGAM減衰率の安全係数依存性、また、それをさらに進めてイオン熱輸送のプラズマ電流依存性をGAMの変化により説明したAngelino (EPFL)のジャイロ運動論的シミュレーションが紹介され注目を集めていた。Scott (IPP)の招待講演では、周辺乱流解析に向けたジャイロ流体シミュレーションの最近の進展、および、欧州の統合シミュレーション計画の一環として進めている乱流シミュレーションのベンチマーク計画が紹介されていた。この中で、ベンチマーク計算の一例が紹介されており、非常に興味深い結果が報告されていた。ITG (Ion Temperature Gradient Driven) 乱流のジャイロ運動論的シミュレーションでは、線形不安定でありながらゾーンアルフローによって非線形的に乱流輸送がほぼ完全に抑制されるパラメータ領域が見つかったが、従来のジャイロ流体モデルではこの領域を再現できないとされていた。しかし、Scottによってエネルギー保存を満たすように新たに定式化されたジャイロ流体モデルはこのパラメータ領域の再現に成功していた。一方、Sarazin (CEA)の招待講演でも運動論モデルと流体モデルによるITG乱流シミュレーションの比較によりこの問題が詳細に議論されていたが、流体モデルではこのパラメータ領域を再現できず輸送レベルを過大評価するという従来と同様の結果が報告されていた。また、ゾーンアルフローによる輸送抑制に関しては、従来の理論とは異なる結果が報告されており、輸送抑制はゾーンアルフローの速度シアではなく曲率と強い相関があることがスラブ配位ITG乱流のジャイロ運動論的シミュレーションによって示されていた。一方、Hahm (PPPL)のポスター講演では、平衡流を含むITG乱流における乱流伝播のジャイロ運動論的シミュレーションが報告されており、平衡流の速度シアが乱流抑制に大きく影響するという従来と同様の結果が報告されていた。このように、依然として、運動論モデル、流体モデルともに、コード間で定性的に異なる結果が報告されており、ベンチマークを通してコードを検証し、物理効果に関する議論を深めることが重要だと認識した。

慣性核融合関連のセッション名は旧来の分類に戻り

“ビーム物理と慣性核融合 (Beam Plasma and Inertial Fusion)” となっており、慣性核融合を直接対象としたものよりも高強度レーザーを用いた粒子加速や高速粒子の輸送、アト秒パルス発生、レーザーショックによる高エネルギー密度科学 (warm dense matter や状態方程式) 等の高強度レーザーに関連した基礎物理・応用の発表が多かったように思う。

粒子加速については高エネルギー化・単色化が精力的に進められている。電子加速では、臨界密度以下のガスジェットターゲットと高強度レーザーの相互作用で生じる“バブル加速”による単色電子ビーム (70 MeV, $\Delta E/E \sim 3\%$) の発生、さらに対向レーザーを照射することで強制的にバブル内に電子を入射させる方法で、より高エネルギー (~ 200 MeV, $\Delta E/E \sim 5\%$) の電子ビームを再現性よく発生させた実験結果が紹介された。イオン加速については Ti-foil ターゲット上に dot 状 (0.5 μm 厚, $20 \times 20 \mu\text{m}$) の p を貼り付けることでビームの単色化に成功した例 (実験 + シミュレーション)、平板ターゲットの裏面に漏斗を逆向きに取り付けたような “Pizza-cone” により p をより高エネルギーに加速した例、パラジウム平板ターゲットに数 $\sim 1000 \text{ \AA}$ 厚の C をドープし、ターゲットを $\sim 1,100 \text{ K}$ まで加熱することでターゲット中の p を除去した上でレーザーを照射して、C を 3 MeV/u ($\Delta E/E \sim 17\%$) まで加速した結果等が報告された。ターゲット裏面のビーム伝播領域にシリンダーを置き、ビーム伝播に同期してこのシリンダーにレーザー照射してシリンダー内にシース電場を形成し、プロトンビームの収束およびエネルギースペクトル調整を行う方法も示された。これらの粒子加速については、今後のレーザー増強・高精度化 (各国で計画中・もしくは進行中) により、更なる進展が見込まれる。

慣性核融合に関しては、直接照射、間接照射、Z-pinch での爆縮実験や解析結果、高速点火における高速電子輸送やコア加熱過程の解析結果等が報告された。Betti (LLE) からは picket pulse を用いた shaped pulse による RT 成長率抑制法や高速点火を想定したクライオターゲットに対する高密度爆縮の pulse shaping (slow implosion)、その結果得られる爆縮コアに外部加熱を加えて行った燃焼計算に基づく利得評価の報告が行われ、爆縮レーザー 200 kJ + 加熱レーザー 50 kJ で利得 ~ 100 実現の可能性が示された。Honrubia (Madrid 工科大) の 3D Hybrid コードを用いた高速電子によるコア加熱解析では、コアへのエネルギー付与は collisional process が支配的であること、電子ビームがコアまで伝播する途中に Weibel 不安定性によりフィラメント化してコアを非一様に加熱し、局所的には電磁場を無視した場合よりも温度が高くなることが示された。パラメータサーベイにより、ビーム電子のエネルギーが低いほど (1.5 MeV 程度) コアへの付与エネルギーは大きく、またコン-コア間距離が離れすぎると加熱が急激に悪くなり、100 μm 以内が望ましいことが示された。Atzeni (Rome 大) はこれまでの高速点火の点火条件解析をさらに進め、加熱ビームの飛程やビーム半径を考慮したものに改良した結果を報告した。100 kJ 程度の加熱レーザーで点火させるには

高密度爆縮 ($300 \sim 400 \text{ g/cm}^3$) が不可欠で、且つ高速電子の飛程が古典的な値より短くなるか、加熱レーザー波長をより短波長にする必要があることを指摘した。これらの実験や解析結果の報告とは異なり、Batani (Milano 大) は高速点火の課題を列挙し、実際に高速点火に対する Critical analysis と Critical review の必要性を訴えた。特に“コア加熱の要請 (10 kJ/10 ps local heating) を満たすような電子ビームをコアに入射することが可能か?” という点では、実験による実証とともに、高強度レーザー照射から爆縮コア中でのエネルギー付与・核燃焼点火までの一貫した解析により、高速点火実現の可能性について提示する必要性を強く感じた。

現存の高強度レーザーの増強計画や新プロジェクトに関する報告では、フランスに建設中の LMJ 以外に、イギリス Rutherford lab. の Astra laser や Valucan laser の増強、フランスの LIL (LMJ のプロトタイプレーザー) に PW を追加する計画、さらにはヨーロッパ全体として次世代超高強度レーザー装置 ELI (Extreme Laser Infrastructure: 350 \sim 700 PW, $> 10^{25} \text{ W/cm}^2$) や高速点火実験装置 HiPER (High Power Experimental Research Facility) の構想が紹介され、各国個別にではなく、高強度レーザー物理ならびに高速点火研究を旗印にヨーロッパ連合として動き始めたようである。これらの new project 報告では academic usage もしくは civilian laser という言葉が多用され、軍事研究との併用からの脱却が強調されていたように感じた。

とりまとめ人の関係上、報告が MCF と BPIF に集中していることはご了承いただきたい。その他のセッションに関しては、DLTP セッションで真壁 (慶応) が招待講演を行ったことのみ明記しておく。

(2006年7月26日原稿受付)