



■会議報告

第32回欧州物理学会 (EPS) プラズマ物理年次大会

日本原子力研究所 那珂研究所 坂本宜照
大阪大学レーザーエネルギー学研究中心 西村博明

欧州物理学会 (EPS) のプラズマ物理年次大会が2005年6月27日から7月1日まで、古代ローマ遺跡で有名なスペインのタラゴナで開催された。タラゴナはバルセロナから電車で西へ1時間ほどに位置した、海辺の静かなリゾート地である。ローマ時代はタラコと呼ばれ、港町として栄え100万人都市であったそうだ。連日の気温は30度を越え日差しも強かったが、地中海性気候のため乾燥しており比較的過ごし易かった。講演会場は天然の岩盤をそのまま側壁として利用した大ホールであり、素晴らしい雰囲気であった。参加者数は750名を越え、欧州を中心に世界各国からプラズマ物理の研究者が集い日本からも66名が出席した。

日々の会議構成の概略は、3件のプレナリー招待講演後、各セッション (磁場閉じ込め/ダスト・低温プラズマ/基礎・天体物理/慣性核融合) に別れて、招待講演、一般口頭発表、ポスター発表が行われた。発表件数が多くまたポスター発表が口頭発表と並列で行われたため、発表を聞いて回るのは大変であったが、どの会場も盛況であった。また慣性核融合のセッションでは、会期中の3日間を使って第8回高速点火ワークショップが開催された。なお、次のEPSはイタリアのローマで開催される予定である。

今回は会議中に ITER サイトがフランスのカダラッシュに決定という大きなニュースがあった。会議2日目の6月28日に議長より報告があり、夕刻には急遽、ITERセッションが開催され、ITER参加六カ国による共同宣言が紹介された。また「THE WAY TO ITER - An overview of Cadarache site -」と題された講演が行われ、EISS (European ITER Site Studies team) のサイト決定までの取り組みを振り返り、ヘリコプターで ITER カダラッシュサイト上空を旋回し、ITER が納められている建家入口まで行く映像がコンピューターグラフィックにより紹介された。そして会議出席者一同が ITER 建設の一步をやっと踏み出したことを喜び合った。ちなみにカダラッシュ近郊のエクサンプロバンスに用意される研究者用住居のレンタル料は月額500ユーロ (70 m²) 程度だそうである。コンファレンスディナーでは、本学会長の高村教授が日本からの参加者を代表して挨拶し、カダラッシュへの ITER サイト決定は残念であること、合意におけるブローダーアプローチは評価できること、強力な国際協力の推進の重要性について話された。

さて磁場閉じ込め関連セッションでの発表内容について概観する。プレナリー招待講演は、チュートリアル的な内容で6件 (ステラレータ炉コンセプト、プラズマ材料相互

作用、乱流励起シアフロー、プラズマ境界局在不安定性 (ELM)、燃焼プラズマ計測、トカマク輸送への非誘導電流駆動の効果) が行われた。招待講演は19件で、主要装置の最近の成果や主要トピックに関する成果が報告され、発表は物理的な内容に重点が置かれていたのが印象的であった。日本からの招待講演は2件で「JT-60U 長パルス放電における性能向上と制御課題 (原研 坂本)」と「NTM の発生と発展における異常輸送の役割 (原研/クルチャトフ研 コノバロフ)」である。一般口頭発表は24件で、日本からは「LHD における閉じ込め改善プラズマのダイナミック輸送解析 (核融合研 居田)」の1件が報告された。ポスター発表は磁場閉じ込め関連で約450件あった。また低温プラズマセッションでは日本から「マイクロプラズマとマイクロ波の制御と相互作用 (京大 橋)」が招待講演として行われた。

磁場閉じ込め関連の全体的な発表において、ELM や周辺輸送に関する発表 (ELM 緩和、安定性、熱負荷、輸送など) が多いのに対して、内部輸送障壁 (ITB) 関連の発表が少ないことが印象的であった。このことは学術誌における ELM 関連の論文が増加していることに対応するようだ。例えば Plasma Physics and Controlled Fusion 誌に掲載された ELM 関連の論文が最近5年間で急増し、昨年は60件にも及んだそうである。これらは国際トカマク物理活動 (ITPA) において ELM による熱負荷低減が重要課題の一つであることに加えて、近年の計測器性能の向上や理論・モデリングの進展によるところが大きい。ELM 緩和について、DIII-D では主トロイダルモード $n=3$ の外部磁場を定常で印加することにより、ITER レベルの低衝突周波数領域で H モードの閉じ込め性能を維持しつつ ELM を完全に抑制することに成功した。その際 QH モードと同様に密度が減少し温度が上昇するが、なぜ粒子輸送が増大するのかについてはわかっていない。これに対し、TEXTOR の Dynamic Ergodic Divertor 実験ではストキャスティック層により電子温度が急激に減少する。今後のモデリングによる物理機構の理解に期待したい。また JT-60U からは、トロイダル回転制御により ELM 周波数の制御が可能であること、QH モードが CO 入射により生成され ITER への適用可能性、ELM 間輸送解析が報告された。トロイダル回転シアの効果を検討したピーリング・バルーニングモード解析 (ELITE コード) において、ELM 発生に対する影響は小さいがモード構造が変形されること、3次元非線形シミュレーション (BOUT コード) により、ELM バーストによるフィラメント構造が再現された。

ITB 関連の発表では、電子系 ITB と磁気シアや有界面との関係が主に議論されていた。また ASDEX-U では、イオン系 ITB 形成条件として熱化イオンのビームイオンによる希釈を議論し、TRANSP コードによる高速イオン分布の

時間発展とITB発生時刻・位置や密度閾値等が実験と良く合うそうである。数年前から荷電交換分光法によるポロイダル回転測定において、種々の原子過程効果により測定が困難になる場合があることが話題になっていたが、DIII-Dから推測されるポロイダル回転は、新古典理論による予測値と大きく異なることが報告された。

上述以外でいくつかの装置からの主要な結果について簡潔に列挙する。

ASDEX-Uからは、improved H-modeをベースにしたITERのハイブリッド運転予測や、タングステン不純物の発生・輸送について報告があった。DIII-Dでは、抵抗性壁モード(RWM)の帰還制御を行うことにより $\beta_N \sim 4.0$ の負磁気シアプラズマを2秒間維持に成功した。JT-60Uからは、強い自律系である高自発電流割合(75%)を持つ負磁気シアプラズマをITB制御によりディスラプションを回避し電流拡散時間の2.7倍維持した成果や核燃焼模擬実験などについて報告があった。LHDからはベレット入射時の輸送の分岐特性、熱拡散係数の電子温度依存性、高ベータ実験における電磁流体力学的(MHD)特性などが報告された。フランス/カダラッシュのTore Supra装置からはRFパワー変調による粒子輸送や高密度プラズマの長時間放電におけるプラズマ壁相互作用などが報告された。スウェーデンのRFP装置(EXTRAP T2R)では128個の磁気コイル(ポロイダル方向4, トロイダル方向32)を用いて異なるモード数を持つ複数のRWMを帰還制御により抑制し電流拡散時間の7倍維持した。ステラレーターでは、4つの装置(CHS, HSX, LHD, TJ-II)において輸送特性や安定性の比較を行っていた。

今回は、Plasma Physics and Controlled Fusion誌がスポンサーの学生ポスター賞が企画されており、4名が受賞した。その中に東京大学の石大氏の「CHSの周辺輸送障壁におけるビーム発光分光による密度揺動計測」に関する発表が含まれている。喜ばしい限りである。また、博士課程に在籍するプラズマ乱流に関する優秀な1名の学生に対して送られる伊藤早苗教授による伊藤プロジェクト賞が企画され、ドイツのTEXTOR装置で研究するSchmitz氏が受賞した。

欧州には数多くのトラス型磁場閉じ込め装置があり、若手研究者が大勢発表を行っていた。10年後にはITERで20年間におよぶ本格的な核燃焼実験が開始されることを考えると、準ホスト国である我国において長期的かつ戦略的な人材育成が必要であることを痛切に感じた。

さて慣性核融合関連セッションでの発表内容について概観する。セッション名は「Inertial Confinement Fusion 慣性核融合」とされているが、対象はレーザープラズマ物理全般がカバーされている。実のところ、欧州連合体が進める慣性核融合プログラムは存在していない。これは、慣性核融合研究項目の一部が米仏英を中心に進められる国防研究と重なるため、明確な切り分けを求める欧州連合体内の足並みが揃わないためである。しかし、このような状況にあって、欧州のレーザープラズマ物理研究者は、本領域を活性化しようと数多くの努力を重ねられてきた。今回のプ

ログラム構成にもその結果が随所に伺える：(1)欧州はもとより米国、日本における慣性核融合研究から顕著な成果を選び、プレナリー講演として招待している。米サンディア国立研からのZピンチ生成X線駆動核融合しかり、阪大レーザー研の高速点火FIREX計画しかりである。プレナリーセッションは参加者の全体が出席できるようプログラムされた特別講演であるから、世界の現状を欧州プラズマ研究者に知らしめるには効果がある。(2)EPSと第8回高速点火に関する国際ワークショップが並行に開催された。この高速点火ワークショップはEPSとは独立に開催され、今年は欧州が担当であった。その機を生かして、欧州研究者と他国の研究者の相互交流が期待された。(3)4年前、筆者はマデイラ島(ポルトガル)で同様な併設構成の会議に参加する機会を得たが、それと比較しても確実に参加者が増えている。特に米国からの参加者が4倍増した。一部の研究者を除き、米国は高速点火方式に関して静観を決め込んでいたが、我が国を中心とする一連の高速点火研究の急速な進展に刺激され、高速点火方式オプションが拡大されつつある。(4)今回、Alfvén学術賞がワイヤーレー式のZピンチプラズマ安定発生とX線源開発に貢献のあったM.Hines(インペリアル・カレッジ), T.W.Sanford(サンディア国立研), W.P.Smirnov(クルチャトフ研)の3氏に授与された。慣性核融合に携わるものとしては同慶の至りである。ポスター発表を除いた招待講演、一般口頭発表講演数での比較では全体170件中66件が慣性核融合関連であった。ポスター発表での慣性核融合比率はこれほどでもなかったが、関係者の努力は実ったといえよう。

さて、発表内容に視点を移してみよう。大型レーザー核融合プログラムに関しては米ローレンス・リバモア国立研の国立点火施設NIFでの1クラスター実験(17kJ/1~10ns)の成果、仏ボルドー研・レーザーメガジュールLMJ施設を想定した高利得ターゲット設計と米仏共同実験との比較、日本における超高強度レーザープラズマ中のエネルギー輸送研究の進捗などが核融合研究としてハイライトできよう。レーザープラズマ相互作用研究の対象はナノ秒プラズマからサブピコ秒プラズマと守備範囲を広げている。前者は主としてNIFやLMJ核融合プラズマで重要であり、後者は高速点火核融合において重要である。特にNIFホールラムにおけるナノ秒プラズマ中での誘導ブリラン散乱(SBS)や誘導ラマン散乱(SRS)研究の結果が興味深い。これはNIFプラズマのような数mmもの長スケールプラズマがあるとSBSなどのパラメトリック相互作用の結果、高速粒子が発生するばかりか、反射光がレーザーシステムを破壊する心配すらあるからである。しかし、今回発表された1クラスター実験結果はこれらの心配を払拭した。変換効率率は以外と少なく、投入エネルギーの高々0.5%がSBSで、0.05%がSRSであったと報告された。NIF計画を継続する上で望ましい結果である。ただ、なぜそのように低いのか、物理解明はこれからである。

流体力学的不安定性の実験は大型レーザー装置の存在が不可欠であり、理論を除いて、流体不安定性の研究は欧州では皆無といってよい。同様に、X線レーザーやオパシ

ティ研究を除いて、輻射変換や閉じ込め物理（総称して、ホーラム物理とも呼ばれる）の物理議論も皆無に等しい。一方で超高強度レーザー生成プラズマに関する研究は活発である。高速点火核融合という主題に直結し、しかし必ずしも巨大な研究施設を要求しないことがその理由であろう。

爆縮プラズマの加熱実験は成功したが、その物理はまだ完全には理解されたわけではない。こうした共通認識のもと、EPS 後半3日間に開催された「高速点火国際ワークショップ」の話題の中心は、超高強度レーザー照射下での様々な非線型相互作用、高速電子やイオンの発生物理、プラズマ中の輸送、そしてエネルギー付与と加熱物理となった。高速点火研究は、超高強度レーザーを用いた基礎研究と爆縮プラズマを発生してこれを追加加熱する統合実験とに分けることができる。後者の研究ができる環境にあるのは現在、阪大レーザー研に限られるが、これを追うように高エネルギー超短パルスレーザー装置の建設が進んでいる。

米国ロチェスター大学レーザーエネルギー研究所 (LLE) では OMEGA-EP (extended performance) とよばれる装置 (2.5 kJ/0.5 ps) が2007年完成をめざして建設中である。ローレンス・リバモア国立研で建設の進むNIFでも高速点火がオプションとされている。また、サンディア国立研ではZ-ピンチ X線駆動爆縮プラズマに Z-beam と呼ばれるペタワットレーザーを追加加熱する計画である。なお、LMJでの高速点火オプションはまだ明確ではない。しかし、基礎研究では仏・高強度レーザー研究所 (LULI: リューリ) が、英・ラザフォード・アップルトン研究所が大型ペタワットレーザーを用いたプラズマ研究を牽引している。

本会議の招待講演は Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion 誌に掲載される予定であるので、発表内容の詳細はそちらに譲る。なお、次回的高速点火ワークショップは米・ロチェスター大学 LLE 主催で開催される予定である。

(2005年8月9日原稿受付)



内外情報

■会議報告

第27回電離気体現象国際会議 (XXVIIth International Conference on Phenomena in Ionized Gases (ICPIG))

金子俊郎(東北大学大学院工学研究科電子工学専攻)

第27回電離気体現象国際会議が、オランダの Eindhoven で2005年7月18日から22日まで5日間の日程で開催された。

主要な参加国と参加者数を列举すると、開催国のオランダ61名、日本57名、ドイツ50名、ロシア24名、フランス22名、米国19名、ルーマニア19名、韓国14名、イラン12名、チェコ12名、ベルギー10名等であり、全41カ国からの参加であった。全体の参加者数は378名で、前回のドイツ Greifswald の開催時402名から若干減少したものの、会場はほぼ満員で連日活発な議論が繰り広げられた。

本会議のトピックスは非常に幅広い分野を対象としており、下記の20に分類されている。

1. Kinetics, thermodynamics and transport phenomena.
2. Elementary processes.
3. Low-pressure glows.
4. Corona's, sparks, surface discharges and high pressure glows.
5. Arc discharges.
6. High-frequency discharges.
7. Ionospheric, magnetospheric and astrophysical plasmas.
8. Plasma diagnostic methods.
9. Plasma wall interaction, electrode and surface effects.

10. Physical aspects of plasma chemistry, plasma processing of surfaces and thin film technology.
11. Generation and dynamics of plasma flows.
12. Non-ideal plasmas. Clusters and dusty plasmas.
13. Waves and instabilities, including shock waves.
14. Nonlinear phenomena, self-organization and chaos.
15. Particle and laser beam interaction with plasmas.
16. Plasma sources of radiation.
17. Numerical modeling.
18. Plasmas for environmental issues.
19. Highly ionized, low-pressure plasmas (plasma thrusters, ion sources and surface treatment).
20. High-pressure, non-thermal plasmas.

本会議の口頭発表は招待講演34件 (General Invited Talks 9件, Von Engel Prize Lecture 1件, Topical Invited Talks 24件) およびワークショップ15件であり、ポスター発表は約350件であった。今回の会議の特徴としては、大気圧(高気圧) マイクロプラズマに関する発表が非常に多かったように思われた。初日の最初のプレナリーセッションでのイリノイ大学の Eden 教授をはじめとして、表面処理、光源、物質創製などの分野で、多くのマイクロプラズマまたは大気圧プラズマに関する発表がなされ、それに伴う計測技術開発に関する発表も多数あった。

また、本会議の特徴として、話題性のあるテーマを討論するワークショップが会議2日目を丸1日使って行われた。テーマとしては、“Transient phenomena and pattern formation”と“To the memory of Daniel Schram's 65th birthday”が選ばれ、それぞれ7件および8件の講演があっ

た。特に後者のワークショップでは Eindhoven University of Technology の Schram 教授の65歳の誕生日を記念して、Schram 教授の研究成果を紹介しつつ、それに関連する発表がなされた。

今回はさらに Evening Lecture として、「Exotic Gas Discharges」と題した講演があった。講演とはいっても、現地実行委員長の Kroesen 教授らが白衣を着て実験者を演じ、ステージ上に設置されたガラス管内でさまざまなガス放電を実際にデモンストレーションしたものであり(写真参照)、そのタイトルの通りエキゾチックなガス放電の世界を堪能させていただいた。また、研究からは外れるが、今回の会議ではイクスカーションの行き先が直前まで参加者に知らされないという、ミステリーツアー的な変わった趣向がとられた。その心は... 実は目的地が遊園地であり、皆さん子どもに戻って楽しんでほしいということで、筆者自身も久しぶりにジェットコースター等を満喫した。

最後になりますが、本会議ではポスター発表の中から3件を選んで Best Poster Award を表彰することになっており、その1件に日本から M. Kono, M. Y. Tanaka, J. Vran-

jes, S. Yoshimura らのポスター発表が選出されました。誠にありがとうございます。

次回はチェコ共和国のプラハで、2007年7月15~20日の日程で開催予定である。なお、本会議の詳細については、下記のホームページで確認できるので、参照していただきたい。

<http://www.icpig2005.nl/>

(2005年9月4日原稿受付)



内外情報

■第6回プラズマ中の強力マイクロ波に関する国際研究集会 (6th International Workshop "Strong microwaves in plasmas") 報告

出原敏孝(福井大学), 斎藤輝雄(筑波大学),
鎌田啓一(金沢大学), 南 龍太郎(日本原子力研究所),
長崎百伸(京都大学), 伊神弘恵(核融合科学研究所),
佐治他三郎(福井大学), 立川敏明(香川大学)

今年7月24日から8月1日までの9日間、標記国際研究集会(SMP2005)が、ロシア科学アカデミー応用物理学研究所(IAP-RAS)の主催で開催された。この研究集会は、1990年に第1回が開催されて以来、3年ごとに開催されてきた。第1回がスダリで開催されたのを除けば、毎回ボルガ河をゆくクルーズ上で開催されている。2002年の第5回に続いて開催された今回の第6回研究集会も、IAP-RASのあるNizhny NovgorodからSt.Petersburgまでのクルーズ上で行われた。

今回は、計16か国から141名が参加して盛大に開催された。日本からの参加者も回を重ねるごとに増え、ロシアを除けば、ドイツ、米国について3番目に多い8名であった。会議は、午前中を中心にPlenary sessionが行われ、午後はS, HおよびDの三つのセッションに分かれて行われた。セッションSでは、ジャイロトロンを中心とする高出力電磁波の発生、セッションHでは、高出力電磁波のプラズマへの応用として、プラズマ加熱、電流駆動等、セッションDでは、セラミックスの焼結等物質加工への応用、が中心の話題であった。全体で140 papersが発表された。内訳は、

Plenary Lecture 20件, Topical Lecture 23件, 一般講演83件, ポスター14件であった。

以下に各セッションの発表論文について紹介する。

セッションSでは、ジャイロトロンを筆頭に高出力マイクロ波・ミリ波光源に関する講演が行われた。Plenary Lecture 8件, Topical Lecture 8件, 一般講演33件, ポスター14件, 計63件と3セッションの中で最も講演数が多かった。

世界の高出力ジャイロトロンの開発状況に関しては、主なものとして5つの機関から発表があった。Thumm (FZK)は、W7-X用の140 GHz/CW ジャイロトロンの開発状況を報告した。Prototype 管の試験結果に基づいて設計した量産品1号管(エミッションの一様性を向上させ、管内散乱RFによるイオンポンプの過熱を防止した)で、954 kW/3分, 624 kW/693 s, 604 kW/1893 sを達成したこと、また、最高1.15 MWまで出力を得たことを示した。今後、Greifswald siteで0.9-1 MW/30 minの試験予定で、2号管が2005年12月に、さらに3本が2006年から2007年にかけて納入予定とのことである。Denisov (IAP-RAS)は、高電力ジャイロトロン開発の進展を整理し、90年代に始まるCVDダイヤモンド窓の使用がジャイロトロンの準定常運転を可能にし、2000年代のMW級ジャイロトロンのCW運転をもたらしたことを強調した。さらに、同軸空洞ジャイロトロンで、170 GHz/0.7 MWの実績を明らかにした。今後の課題として、1 MWで真のCW運転、2-3%の周波数可変性、1.5-2 MW同軸空洞ジャイロトロン開発、効率60-70%の達成を挙げた。ロシアにおけるITER用170

GHz ジャイロトロンの開発状況は、Usachev (Gycom) が示した。モードコンバータの改良により管内散乱 RF を 2 - 3% に減少させて、NB 窓ジャイロトロンで 170 GHz/1.1 MW/効率48%/0.1 s を達成し、今後ダイヤモンド窓を用いた長パルス試験を実施予定とのことである。さらに、通常の空洞を用いた 170 GHz/1.5-1.7 MW/CPD 効率45% のジャイロトロンを設計し、短パルス仕様のジャイロトロンで試験予定を示した。Blank (CPI) は、W7-X 用 140 GHz ジャイロトロンおよび DIII-D 用 110 GHz/1 MW/10 s ジャイロトロンの開発状況を報告した。後者は diode 電子銃で発振モードは TE_{22,6} である。短パルスながら 1.28 MW/効率 42.3%, 500 kW では 10 s の達成を示した。コレクターや真空窓からのリークが発生したが、設計上の問題ではないとの見解であった。南(原研)は、ITER 用 170 GHz/1 MW/効率50%/CW ジャイロトロンの開発状況を報告した。ジャイロトロン管内のモード変換器、放射器の形状を解析的に最適化し、安定な長パルス動作を妨げる管内散乱 RF を低減したこと、また、カソードヒータの入力パワーをプレプログラミング制御によりブーストすることで電流減少を補償し、0.13 MW/600 s, 0.2 MW/400 s の発振、1,000 s の安定な電子ビームの引き出しに成功した。また、1.5 MW 級の連続発振に対応する超高次モード TE_{31, 12} を用いて、1.56 MW/効率27%, 1 MW/効率30% の発振実験に成功した。

ITER および高電力 ECRH 実験用ジャイロトロンの開発と並行して、今回の会議ではジャイロデバイスの開発として、1. 広帯域 Gyro-TWA, BWO, 2. THz を指向した高周波化、数百 GHz/10 kW オーダの CW ジャイロトロン、3. Linear collider 用短パルス数十 MW 級発振・増幅器等のトレンドが顕著であった。Blank (CPI), Cross (U. Strathclyde-UK), Whyte (U. Strathclyde-UK) は、周波数可変または広帯域 (周波数幅数 GHz), ピークパワー 10-100 kW の Gyro-TWA, BWO 開発計画と実験結果を示した。これに関連して、Samsonov (IAP-RAS) によるパルス圧縮による高出力化の報告があった。THz の実現には、パルス高磁場を用いるものと、高次高調波発振に有利な Large Orbit Gyrotron (LOG) を用いるものがある。出原(福井大 FIR-FU) は、二つの実験の進行状況を報告した。一つは、20 T のパルス磁場を生成して 2 次高調波で 1 THz の発生を、もう一つは LOG で、長岡科学技術大学との共同研究により、400 keV/100 A のビームを用いて大出力で 1 THz の発振を目的としている。双方とも本年度中の実現をめざしている。パルス高磁場を用いた THz ジャイロトロンの開発計画は、Suvorov (IAP-RAS) によっても遂行中の実験の報告があった。LOG に関しては Kalynov (IAP-RAS) 等が 250 keV のビーム、6.5 T の磁場を用いて 369 GHz/20 kW, 414 GHz/8 kW の発振を示した。さらに 80 keV, 13.7 T と低いエネルギーのビームを用いて 1 THz の発振をめざす計画を報告した。また、Linear collider への応用をめざす短パルス/数 10 MW 級マイクロ波源計画も進んでいる。Petelin (IAP-RAS) は、Gyro-Klystron として、現在、30 GHz/12 MW が得られていることと、30 GHz/25 MW/0.5

μs/繰り返し 10 Hz の計画を提示した。Yakovlev (Omega-P, USA) は、11.424 GHz/60 MW およびこの 3 倍の周波数 34.272 GHz/45 MW の Magnicon の設計を示した。いずれも数 100 kV, 数 100 A の電子ビームを用いる。

その他として、2-D Bragg resonator に関して、Arzhanikov (BINP-RAS) が 1 MeV/1 kA のシートビームを用い 75 GHz の実験を報告し、Peskov (IAP-RAS) も 60 GHz のコールドテストとモードの選択性の問題を指摘した。これらに関連して、Ginzburg (IAP-RAS) はモード選択性に優れた advanced Bragg FEM の提案を行った。超放射関連では Zotova (IAP-RAS) が強い 38 GHz のポンプ波を発生し短い電子ビームと相互作用させることで 150 GHz の超放射を得た。鎌田(金沢大)は 600 keV/5 kA の大強度電子ビームをコルゲート型発振管に入射し、5 GHz/300 MW の超放射出力を得、波形整形により出力向上の可能性あることを報告した。また、加速器関連では Smirnova (LANL) から photonic band gap oscillator の実験で、工作精度をあげ 17.3±0.3 GHz のものを作り、MIT の 16.5 MeV の電子ビームを 1.4 MeV 追加速したとの報告があった。さらに Wakefield による粒子加速の理論の報告が Marshall (Columbia Univ.), Onishchenko (KIPT) によってあり Round Table Discussion も行われた。

今回の会議では、ビームや空洞およびモード変換器の設計に商用のコードが多用されるようになってきたという印象を持った。また、米国に渡って研究するロシア人が多く見られた。このことは、今後この方面の研究水準をさらに押し上げるだろう。

セッション H では、Plenary Lecture 6 件、Topical Lecture 8 件、一般講演 23 件、計 37 件の講演が行われた。セッションの主な話題は、電子サイクロトロン電流駆動 (ECCD) による MHD 不安定性の安定化、電子バーンスタイン波 (EBW) 加熱、定常 ECH プラズマ、電子内部輸送障壁に関連した熱・粒子輸送解析、ジャイロトロンを用いたイオントムソン散乱計測、ECH/ECCD システム開発等であった。Plenary Talk として、W7-X の 140 GHz ECH システムの開発状況 (Erckmann), TCV における ECH 加熱実験 (Pochelon), LHD における内部輸送障壁形成と定常プラズマ実験 (伊神), TEXTOR における MHD 不安定制御 (Schuller), DIII-D における ECH/ECCD 実験 (Lohr) があった。これまでのワークショップでは話題になかった定常プラズマのトピックスが今回入っており、ジャイロトロンと伝送系の開発の進展により一系統あたり 1 MW パワーで CW 運転が可能な ECH/ECCD システムの実現が間近いことを期待させる。

新古典ティアリングモード (NTM) は大型トカマクにおいて β 値の上限を決定する不安定性の一つであり、NTM 励起の抑制、安定化が ITER における重要な課題の一つとなっている。NTM はティアリングパラメータが負であるにもかかわらず、磁気島内の圧力分布の平坦化によるブートストラップ電流の消失による効果で磁気島が成長する。NTM 安定化手法の一つは、ECCD による磁気島内で消失したブートストラップ電流の補償である。今回の会議では

DIII-D, AUG, TEXTOR, FTU, T-10から従来のティアリングモードおよびNTMに関連した報告があった。DIII-DではJT-60Uと同様にNTMが励起される前にECCDを印加し、 $m/n = 2/1$ NTMの励起回避に成功している。また、AUGでは鋸波振動をECCDにより制御しNTM励起を抑制した。ECCDによるNTM安定化の課題は、磁気島の位置と大きさに合わせた正確な駆動電流分布制御と、ブートストラップ電流密度と同程度の電流駆動である。AUGでは駆動ミラーの実時間制御が可能のように入射システムを改良中で、今後実時間制御実験を予定している。

Hセッションのトピックスの一つとして、電子バースタイン波を用いた加熱・電流駆動に関する多くの報告があった。電子バースタイン波は静電波の一種であり、O-modeまたはX-modeからのモード変換によってプラズマ中に励起する必要があるものの、カットオフによる密度上限がなく高密度領域で適用可能であることや低電子温度でも100%近いパワー吸収が得られるという長所がある。TCVでのO-X-B加熱実験では、ELMのないH-modeプラズマにおいて、蓄積エネルギーの上昇、stray microwave radiationの変化が観測された。O-X-B加熱には入射角にアクセス窓があり、TCVの場合約5度程度であった。実験で得られた変換効率率は60%と推定されている。LHDからは、 $n_e = 1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 程度のプラズマでの強磁場X-mode入射によりX-B加熱を示唆する実験結果の報告があった。入射角及び入射モードのスキャンにより電磁波モードの吸収との切り分けを行い、電磁波共鳴層よりも小半径内側にてパワー吸収が生じていることが示された。一方、MASTのO-X-B実験では加熱効果が観測されておらず、その理由として、ある閾値パワーを超えるとパラメトリック減衰不安定性が発生することで低域混成波(LHW)が励起されEBWへの変換が生じないとの理論解析があった。しかしながら、W7-AS,TCVでの加熱実験の成功から見ても、大部分のパワーがLHWに変換される理論には疑わしい点があり、励起波の実験的な検出が今後重要となる。EBWについては上記以外にも多くの報告がなされたが、レイトレーシング計算や相対論的効果の評価など理論解析であり、有効な加熱モードとしての実証のためには今後さらに実験を行う必要があろう。

LHDとW7-Xからは定常運転に関連した報告があった。LHDでは84 GHz 110 kW ECHにより3,900秒にわたって中心電子温度1 keV以上、電子密度 $1.5 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ のプラズマの維持に成功した。高次モードを除去するモードフィルタを設置してジャイロトロン側へのパワーの戻りを減少させ、伝送系コンポーネント(DCブレイク、真空排気用導波管)にリークマイクロ波対策を施し、また、その冷却性能を強化したことでハードウェアの長時間運転が可能とした。このことは、定常化に向けて損失パワーの低減・伝送系の冷却の重要性を示している。放電時間はデータ取り込みによって制限されており、プラズマの閉じ込めやハードウェアの限界の問題ではない。W7-Xからは140 GHz 10 MW ECRHシステムの開発状況についての報告があった。140 GHz ECRHシステムはW7-Xにおける主要な加熱

手法であり、定常運転に向けての開発を進めている。現在、CPIジャイロトロン近傍でのパワー測定で0.8 MW 30分の運転が可能となっている。W7-XでのECH実験は密度領域によって利用するモードを選択し、第2高調波X-mode ($n_e = 0.1 - 1.0 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$)、第2高調波O-modeまたは第3高調波X-mode ($n_e = 1.0 - 2.0 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$)、OXB変換によるEBW加熱 ($n_e = 2.5 - 4.0 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$)のシナリオを立てている。W7-Xの実験開始は2012年を予定している。

ITERのECH/ECCDランチャーシステム開発に関する報告は2件あった。伝送方式には導波管伝送とミラーによる空間伝送の選択肢があるが、ITERではコンパクト性、トリチウム遮蔽を考慮して導波管伝送が採用されている。条件の厳しいITERの入射ポートにおいてパワー20 MWが入射可能なランチャーとして、遠隔駆動アンテナの開発が数年前より進められており、Stuttgart University (Kasperek)とFOM (Verhoeven)から開発の現状について報告があった。入射角が ± 12 度の範囲でガウス分布形状を保った入射ビームを形成することが可能であり、偏波面依存性はない。中性子環境下での利用のためマイターバンドによるドッグレッグ形状伝送が提案されているが、モード変換によるマイターバンドでのパワー損失が比較的大きいことやアーキングの発生などの問題があるため、ITERでの使用はまだ決定されていない。

その他として、ヘリオトロンJ(長崎)から第2高調波ECHによるプラズマ生成に関する報告があった。第2高調波ECHによるプラズマ生成はヘリカル系において日常的に行われているが、基本波ECHによるプラズマ生成とは対照的に線形理論では説明できない。入射パワー、偏波面、共鳴層との相互作用位置などの入射パラメタスキャンにより高エネルギー粒子の閉じ込めが重要であることを実験的に示した。また、GAMMA10(齊藤)からは28 GHz ECHパワーを500 kWまで増強することによりイオンの閉じ込めポテンシャルの向上が報告されている。導波管アンテナアレイにより共鳴層で吸収されなかったパワーを測定し、Full wave Maxwell simulation codeによる計算結果との一致を示した。

セッションDでは、Plenary Lecture 6件、Topical Lecture 7件、一般講演27件、計40件の講演が行われた。課題別に整理すると、Plasmaに関するものが29件、Ion Sourceに関するものが4件、Material Processingに関するものが8件報告された。PlasmaではMicrowave Plasmaによるダイヤモンド薄膜生成について5件報告され、主に高品質薄膜の高速生成法について述べられた。なかでも30 GHz ミリ波を使った場合の生成速度は、245 GHz センチ波の場合の8倍であったという報告に注目が集まった。Plasma発生方法に関するもの13件、Microwave Plasmaの理論的な解析あるいはモデルに関するもの6件が報告された。Material Processingではセラミックス等の焼結については4件で、Bayreuth University, Pennsylvania State Universityにおける多くの実績が報告された。また新しい概念としてマイクロ波電界強さがMicrowave Processingの機構に及ぼす影響について、強い電界中で処理すると焼結、結晶化

はより低い温度で起こる, 電磁界中での化学反応温度に強い影響を及ぼすことなどを示し, 反応温度, 電界強さの関係図(状態図)作成の可能性について述べられ注目された. 本年の発表の中で, 特異的なものとしてジャイロトロン医療・生物学への応用として, 「ジャイロトロンを光源としたミリ波・サブミリ波カテーテル生体照射装置」という

テーマで立川(香川大)からの発表が1件あった. これはジャイロトロンから発振された高強度ミリ波を, 極細導波管をとうして生体内部まで導きガン等を照射する装置で, 発表では, 局所照射を有効に行うための無反射アンテナが提案された.

(2005年9月1日原稿受付)



内外情報

■US-Japan JIFT ワークショップ "Integrated Modeling of Multi-Scale Physics in Fusion Plasmas" combined with 4th annual meeting of Burning Plasma Simulation Initiative

福山 淳(京都大学大学院工学研究科),
矢木雅敏(九州大学応用力学研究所)

標記ワークショップが2005年9月13日-15日の期間, 九州大学応用力学研究所において開催された. このワークショップは九州大学応用力学研究所研究集会「核燃焼プラズマ統合コード研究会」との共催で行われた. 参加者は31名, 発表件数は27件(内訳: 日本18件, アメリカ6件, ヨーロッパ2件, 韓国1件)であった. 発表件数に関しては国内, 海外の比率がおおよそ2対1の割合であり, バランスのとれたワークショップであったと言える. プログラムは6つのセッション: (I) Integrated Modeling(4件), (II) Edge-Core Integration(5件), (III) Computation(2件), (IV) Wave and MHD(4件), (V) Transport Modeling(7件), (VI) MHD and Transport(5件, うち2件は核融合以外)から構成された.

セッション(I)では Jardin, Becoulet, 福山がそれぞれ米国, ヨーロッパ, 日本における核燃焼プラズマのための統合化モデル構想の活動状況や今後の研究計画を報告した. 活動自体は日本が米国, ヨーロッパに先行したが, 米国, ヨーロッパではすでにプロジェクトとして研究組織が確立し, 大型研究予算が正式に承認されており, ボランティア活動としてプロジェクトを遂行している日本が追い越されるのは時間の問題であると感じた. セッション(II)では Park が韓国における活動状況を報告したが, ソウル国立大学, KBSI を拠点として Core-Edge 統合化モデルプロジェクトが進行しつつある. Kritiz がコア, ペDESTAL, ELM の動力学統合モデルによるシミュレーション結果を報告した. 小関が原研における核燃焼プラズマに対する取り組みを紹介した. また, Chang が CPES (Center for Plasma Edge Simulation) プロジェクトの概要を報告した. セッション(III)では計算科学に関する報告がされ, 実時間での実験データ解析を意識したコード開発(徳田)や新しい粒子シミュレーションスキーム(藤堂)が報告された. セッション(IV)では Bachelor が高エネルギー粒子と MHD

の相互作用を統合化するプロジェクト SWIM (Simulation of Wave Interaction of MHD) を紹介した.

セッション(V)では Weiland が運動量輸送を輸送コードに取り込み, Dimits shift が流体モデルでも説明できることを示した. 鶴沢が外部平均流の帯状流生成に及ぼす効果を報告した. また本多が輸送シミュレーションによる CDBM モデル, GLF23 モデル, Weiland モデルの比較結果を報告した. GLF23 モデルの結果に関してアメリカ側からコメントがあり, ベンチマークに関して今後, 情報交換を進めていくことになった. 林は ITER における定常オペレーションの輸送シミュレーション結果を報告した. セッション(VI)では草野がさまざまな分野における多スケールシミュレーションのための Interlocking model (統合モデル)を紹介し地球シミュレータにおける研究事例を報告した. また矢木が BPSI 計画の一部として ITBL (IT based Laboratory) を用いた grid computing の取り組みを紹介した.

全体としてワークショップ前半はプロジェクトの研究計画やフレームワークを中心に報告がなされ, 後半では各論を通じて結果が報告された. 米国では統合シミュレーションをめざした2つの新しい SciDAC プロジェクト, CPES と SWIM, が開始され, これまでの蓄積をベースに意欲的かつ組織的に研究が進められようとしている. 日本国内においても, 統合シミュレーションの成果は上がり始めてはいるが, より組織的な将来計画を提案していくことが必要であろう. また, 個人的な印象として, 異なるスケールを結合する新しいモデル(例えばサブグリッドモデルの一般化), 数値手法や並列化手法のテーマをもう少しプログラムの中に盛り込んでもよかったのではと思う. 来年度の JIFT ワークショップはアメリカ側からオークリッジを開催候補地にしたい旨, 提案があった.

なお, プログラムの詳細に関してはホームページを参照いただきたい. <http://bps.nucleng.kyoto-u.ac.jp/bpsi/usjws3/>

最後にこのワークショップを開催するにあたり, 九州大学応用力学研究所共同利用研究・集会旅費, 浅田榮一研究奨励金, 科学研究費補助金(基盤研究(B)16360459, 特別推進研究16002005)の支援をうけたのでこの場を借りて感謝の意を表したい.

(2005年9月21日原稿受付)