



■会議報告

26th Symposium on Fusion Technology (26th SOFT)

小林貴之 (原子力機構), 梶原 健 (原子力機構),
中道 勝 (原子力機構), 河村繕範 (原子力機構),
花田磨砂也 (原子力機構), 設楽弘之 (原子力機構)

2010年9月27日から10月1日までの5日間、ポルトガルのポルトで行われた。ポルトはポルトガルの北部、リスボンより北300 kmに位置し人口160万人のポルトガル第二の都市であり、北部の商工業の中心である。また、ポルトガル発祥の地として長い歴史を誇り、旧市街はポルト歴史地区として世界遺産に登録されており、街を二分するドウロ川にかかる印象的な橋とあいまって風光明媚な魅力的な街であるという印象を受けた。また、ドウロ川上流のぶどうの産地で生産されポルトまで川を下って運ばれ熟成されるポートワインは日本でも有名であり、街のいたるところで目にすることができた。会期中は好天に恵まれ気温も20度前後と過ごしやすく快適であった。

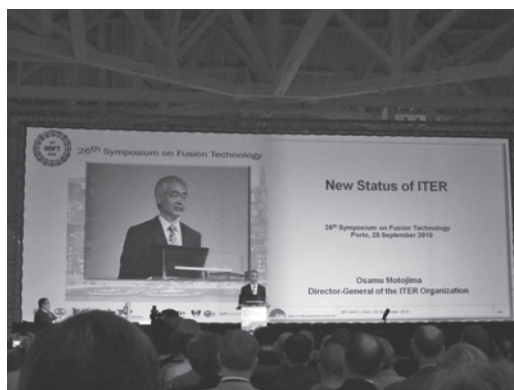
会議はドウロ側沿いの Alfandega Congress Centre で行なわれ、午前前半が招待講演、コーヒープレイクを挟んで午前後半と午後前半が口頭発表、最後にポスターセッションという形ですすめられた。内訳は招待講演が19件、口頭発表が34件、ポスター発表が698件であった。講演はEUの Francesco Romanelli 氏により今後10年にわたる ITER への貢献を目的とする JET の計画についての説明が最初であり、Dirk Hartmann 氏から W7-X の真空容器およびクライオスタッドの40%がすでに完成したと報告があった。また、二日目には ITER 機構長に就任された本島修先生により ITER で予定されている調達のうちすでに60%が締結されているとの説明があった(写真)。また、今後の ITER 計画の進め方について、重複している箇所を減らしてより効率的に計画を進めるために Simplify していくことが重要であるとの認識が示された。次に Pietro Brabaschi 氏による JT-60SA の設計について、トロイダル磁場を下げることでコストダウンを図ったとの説明があった。さらにトカマクに関する発表が続き、KSTAR, EAST などから発表があった。また、Pascal Garan 氏により、IFMIF/EVEDA の進捗状況の説明があり、リチウムターゲットおよびテストセルは予定どおりだが加速器のプロトタイプは2年遅れるという見通しが示された。加熱では Sonato 氏よりパドマに建設予定の ITER 用 N-NBI テストスタンドの説明があり、RF イオン源が2013年より、プロトタイプ加速器が2016年の運転開始が予定されているとのことである。また、EU ジャイロトロンの現状報告が Martin Shmid 氏よりあり寄生発振の抑制が鍵であることが示された。また、ポスター発表では様々な工学的トピックが ITER と関連づけられて発表されており、ヨーロッパ全体として ITER に対するよ

り真剣かつ積極的な取り組みが感じられた。他に余談ではあるが、本島先生の講演ののちに9月に急逝された原子力機構の常松前部門長への黙祷がささげられた。以下に各分野の発表概要を記す。

中性粒子入射装置の分野からは合計24件(招待講演1件、ポスター発表23件)の報告があり、その内訳はイタリア・コンソルシオ RFX 研究所10件、ドイツ・ガルヒンク研究所から4件、ITER 機構から3件、フランス・カダラッシュ研究所2件、韓国、ロシア、インド、米国、日本からそれぞれ1件であり、主に ITER-NBI の設計および開発に関するものであった。

核融合炉材料関連発表については、システムや機器、さらに近年増えてきた各国のテストブランケットモジュール(TBM)設計に関する発表が主であり、口頭発表約50件の内、材料に特化した発表は2件のみであった。一方、ポスター発表においては、設計、シミュレーション等も含まれるが約4割程度が材料関連の発表であった。最近の材料系の国際会議では、中性子増倍材料やトリチウム増殖材料のブランケット増殖機能材料では、後発ではあるものの新材料開発に意欲的なアジア諸国のからの材料創製の発表(例えば、Be-Li 混合酸化物等)があったが、本会議では斬新的な内容は無かったが、ITER 調達に関連する発表や、挑戦的な研究開発項目としては、新 Li 濃縮技術に関するプロセス設計や低放射化フェライト鋼(RAFM)製造の新規参入についての発表があった。

トリチウム関連では、本会議の後にトリチウム国際会議が奈良で開催されることになっていたせい、欧州の会議であるにもかかわらず ITER 機構からの報告が少なく、具体的な議論という観点では多少期待はずれな面があった。一方で、貯蔵システムの調達を分担している韓国からは、その準備状況がわかる報告がなされた。また、トリチウム除去系へ適用する有機系気体分離膜や不純物処理のメンブレンリアクターの数値解析のほか、ブランケットのトリチウム回収系、冷却材浄化系へのゼオライト膜や固体電解質膜



招待講演の様子

の適用など、気体の膜分離に関する報告が印象的で、原型炉も見据え、プロセスを模索している状況がうかがえた。

遠隔保守関連では、ITERに関連した設計・R&D活動が多数報告された。欧州が調達を担当するダイバータ保守装置の実規模試験施設である、フィンランドのDTP2 (Diverter Test Platform 2) における研究活動が前回SOFTの後に本格化したことから、特に成果報告が充実し、マンマシンインターフェースの設計、シミュレータと実機との位置ずれの較正等、活発な議論が行われた。またブランケット、

加熱装置、ポートプラグ、キャスク、炉内観察、ホットセル等の遠隔保守の報告が並び、調達開始に備えた設計・R&D活動の進展が印象的だった。ITERの他では、炉内保守の実績を持つJETから次期シャットダウンに向けた開発の報告がなされ、ボルト等の取合い部品を保守対象機器に内蔵することによる保守時間の短縮や、市販のカメラを用いてステレオビジョン位置計測装置を構成することによる低コスト化など、ノウハウを生かした開発の報告が興味深かった。

■第63回気体エレクトロニクス会議 (GEC)・第7回反応性プラズマ国際会議 (ICRP)・第28回プラズマプロセッシング研究会 (SPP) 合同会議

柴垣寛治 (鈴鹿高専)

2010年10月4日から8日までの日程で、フランスのパリ市内にある Maison de la Chimie を会場として、第63回気体エレクトロニクス会議 (Gaseous Electronics Conference: GEC) / 第7回反応性プラズマ国際会議 (International Conference on Reactive Plasmas: ICRP) / 第28回プラズマプロセッシング研究会 (Symposium on Processing Plasmas: SPP) 合同会議が開催された。GECはアメリカ物理学会が主催し、気体放電現象とその応用に関わる基礎研究を議論する会議である。一方、ICRP/SPPは日本の応用物理学会プラズマエレクトロニクス分科会が主催し、プラズマプロセスに関連する諸現象の基礎、反応性プラズマの制御手法の確立、および最先端のプラズマ応用について議論する会議である。SPPは年1回開催されており国内研究者の重要な発表の場となっているが、3年に1回国際会議として開催することとしたのがICRPである。1991年の第1回から数えて7回目の開催となったが、1998年にハワイでGECと合同会議を行ったことがあり、今回が2回目のGECとの合同会議となった。会期中は、32のセッションが設けられ、41件の招待講演と222件の一般口頭発表が3室ないし4室並列で進行されたほか、3つのポスターセッションで562件のポスター発表がなされた。セッションと招待講演者 [所属] は次の通りである (敬称略)。

1. プラズマエッチング (Olivier Joubert [CNRS], Kouichi Ono [Kyoto Univ.], H. Hayashi [Toshiba])
2. プラズマ-表面相互作用 (Rosa Di Mundo [Univ. of Bari], Vincent Donnelly [Univ. of Houston])
3. モデリング・シミュレーション (Amnon Fruchtman [Holon Institute of Technology])
4. バイオ・環境応用 (Jimena Gorfinkiel [The Open Univ.], Jae Koo Lee [Pohang Univ.], Uros Cvelbar [Jozef Stefan Institute])
5. 大気圧プラズマ化学 (Felipe Iza [Loughborough Univ.])
6. マイクロ放電
7. プラズマ堆積 (Kiyoshi Yasutake [Osaka Univ.])
8. 負イオン
9. プラズマジェット (Deborah O'Connell [Queens Univ.])

10. 電子・陽電子と分子の衝突 (Zoran Petrovic [Institute of Physics Belgrade], Michael Allan [Univ. of Fribourg])
11. プラズマナノテクノロジーとフレキシブルエレクトロニクス (R. Mohan Sankaran [Case Western Reserve Univ.])
12. ダストプラズマ (Hiroyuki Kobayashi [Hitachi])
13. プラズマ診断 (Ralf Peter Brinkmann [Ruhr-University Bochum], Hong-Young Chang [Korea Advanced Institute of Science and Technology], John B. Boffard [Univ. of Wisconsin-Madison], Greg Hebner [Sandia National Laboratories])
14. 電子と原子・分子の衝突 (Dmitry Fursa [Curtin Univ.], Kate Nixon [Univ. of Manchester])
15. 誘導結合プラズマ (Emi Kawamura [Univ. of California, Berkeley])
16. グリーンプラズマテクノロジー: 環境・エネルギー応用
17. 液中プラズマ
18. プラズマ中での衝突過程 (A. Cassimi [CIMAP/CIRIL], Albert Viggiano [Air Force Research Laboratory])
19. 光源 (Gerrit Kroesen [Eindhoven Univ. of Technology])
20. 電子と原子・イオンの衝突 (Alfred Mueller [Giessen University])
21. 光起電力応用のためのプラズマプロセッシング
22. マイクロ波グロー放電 (Ron Bravenec [Fourth State Research and Tokyo Electron America])
23. 低温プラズマの基礎物理
24. 高気圧プラズマの自己組織化・診断
25. パルス放電・燃焼 (Svetlana Starikovskaia [LPP Ecole Polytechnique])
26. 重粒子衝突 (Aaron LaForge [Missouri S&T Physics dept.], James Colgan [LANL])
27. プラズマ境界・シース
28. 容量結合プラズマ (Zoltan Donko [Hungarian Academy of Sciences], Yohei Yamazawa [Tokyo Electron AT LTD.])
29. 電気推進 (Stephane Mazouffre [ICARE - CNRS])

上記のセッションの他に、スペシャルイブニングセッション、プレナリーセッション、および Will Allis Prize for the Study of Ionized Gases が企画され、日本からは招待講演として、スペシャルイブニングセッションで白谷正治氏 (九州大学)、プレナリーセッションで畠山力三氏 (東北大学) がそれぞれ講演を行った。なお、スペシャルイブニングセッション

ンの先頭では UC Berkeley の Michael A. Lieberman 氏により, "Plasma Processing for Nanoelectronics - History and Prospects" と題する講演が行われた. 立ち見の聴講者も多数出の中で, 過去の歴史と今後の展望についてユーモアも交えた講演が展開されたのが印象的であった. Lieberman 教授の講演資料は下記ウェブサイトからダウンロードできる (<http://www.eecs.berkeley.edu/~lieber/>). また, 今回の Will Allis Lecture では Univ. of Michigan の Mark J. Kushner 氏による "The Role of Modeling in Developing New Plasma Technologies: Microelectronics to Plasma Medicine

and Liquids" と題する講演が行われた. 短い時間ではあったが, 多くのデータをもとに医療分野等でのプラズマの制御とそれを支えるモデリングの重要性について講演がなされた.

多数の講演が並列で進行していたこともあり参加者によって様々な印象があったと思われるが, アジア地域の着実な研究の進展が感じられた. 今後はプラズマ応用関連の研究テーマがさらに細分化しながら増加すると考えられるので, 本会議の動向には注目したい.

■会議報告

第52回アメリカ物理学会プラズマ物理分科会 (APS-DPP) 年会

政宗貞男 (京都工繊大), 大谷寛明 (核融合研), 坂和洋一 (阪大)

標題会議が2010年11月8日から12日までイリノイ州シカゴで開催された. 1500名以上の専門家が集まり, プラズマ科学からプラズマ教育の進展が報告される巨大な会議である. 本稿では磁場閉じ込め核融合, 基礎プラズマ, 慣性核融合・高エネルギー密度科学分野から執筆者の視点で会議のトピックスを紹介する.

1. 磁場閉じ込め核融合

"3次元" が1つのキーワードであると感じた今回の会議であった. 実験装置や実験結果に3D表示を駆使して大変印象的であった初日のプレナリーに続いて, "3D Fields and Effects" というタイトルの招待講演セッションが設けられていた. ITERのテストブランケットモジュール (TBM) のフェライト鋼がもたらすリップル, キンクモードやRWM, またそれらの能動的フィードバック制御用アクチュエータコイルがつくるサイドバンドなど, トカマクの軸対称性を破る共鳴および非共鳴の磁場構造がプラズマの性能に与える影響を正確に理解することが重要性であるとの認識が高まっている. そのためトカマクだけでなくヘリカル系の知見と解析手法, 最近3次元磁場が注目されているRFPの制御技術と知見など, 磁場配位の枠を越えた研究成果の体系化が求められていると感じた.

DIII-DにおけるITER TBMのモックアップ磁場実験の結果が述べられた. Hモード放電では非共鳴成分によるトロイダル回転速度の低下とエネルギー閉じ込め時間の低下 (ITERの予測値に変換すると5%の低下) が見られるが, Lモードではほとんど影響がないとのことである. この講演をはじめとしてDIII-Dでは3次元磁場構造に対するプラズマの応答, プラズマ性能への影響が数多く報告されていた. その他, カーボン共堆積層の除去, ディスラプション後の逃走電子の制御性の向上, ELM制御, TAEによる高速イオンの損失の増加, ロックしたNTMのECCDによる安定化, 自発的回転の物理機構などが報告された.

NSTXからはCHIによる非誘導プラズマ電流立ち上げの詳細な報告があり, CHIで200 kAまで立ち上げた電流を

OH駆動に接続して磁束を節約し, 500 kAを越える放電が可能になったとの報告があり, 不純物による放射損失が低いので大電流化にさらに有効であるとの見通しが述べられた. STでは非誘導電流割合の高い運転が求められており, このようなプラズマではキンクモードとRWMの安定化が重要になる. NSTXでは受動的および能動的RWM安定化によって, ディスラプションの確率はなお高いが, 不誘導電流駆動割合が50%で規格化 β が6.5を達成したとの報告があった. HBP-EPにおいても, MHD不安定性のフィードバック制御をメインテーマとして, 制御コイル配置の最適化などが, 制御磁場に対する単一金クモードおよびマルチモードの応答, コイル配置, 導体壁およびフェライト壁の配置とモードの制御特性, コイル配置と制御アルゴリズムの最適化などが, エラー磁場がプラズマに与える影響という観点から報告されていた.

リチウムコーティングと液体リチウムダイバータも注目を集めていた. NSTXではリチウムコーティングにより, プラズマ断面形状の三角度とセパトトリクスがダイバータ板を横切るストライクポイントが従来よりも幅広い領域にわたって, ELM-freeのHモード放電が可能となったとの報告があった. また2次のヌル点をもつスノーフレークダイバータ配位の特徴が報告されていた.

MHD不安定性の制御については, 小型スクリーピンチ装置に回転導体壁を導入してRWMの安定性に対する回転壁の安定化効果を調べる実験が報告された. プラズマのフロー分布, 電場分布の制御性がよいため, 幅広い領域にわたって理論と実験の詳細な比較が可能であり, 壁の磁場浸透時間だけでなく磁性体の効果を取り入れる必要性を示すなど, 非常に興味深い内容であった.

トカマク以外の磁場配位では"Alternating Configurations and Startup"という招待講演のセッションが設けられていた. 2つの反転磁場配位 (FRC) プラズマをマージングさせて大型のFRC (C-2) を高温 ($T_e + T_i \geq 500$ eV) で長時間維持できることが報告され, 注目を集めた. LHDからは圧力駆動不安定性の内部構造とその閉じ込め性能への影響を詳細に調べた結果が報告され, 5%の高ベータ領域で観測される局所的な密度や温度の局所的な平坦化と閉じ込めへの影響が議論された. MST RFPではテアリングモードの振幅と磁場のストキャスティシティーおよびRechester-Rosenbluthメカニズムによる輸送の関係が詳細に調べられている. 先に紹介したようにNSTXからはCHI

による初期プラズマ電流の立ち上げの報告があり、トカマク配位形成までの磁場配位の発展が議論された。いずれも最初に述べた3D磁場効果と対応する内容であった。

3D磁場効果は最近、逆磁場ピンチ(RFP)でも注目を集めている。軸対称境界の内部に自発的に形成される立体磁気軸RFP配位とヘリカル系の類似性と相違点が、ヘリカル系で開発された解析手法を適用して詳細に調べられつつある。また、共鳴磁場成分を印加したときの磁場のストキャスティシティーとその閉じ込めへの影響は、外部磁場によるELMの能動的制御やRFPのマルチモード状態、さらにヘリカル系の周辺領域の磁場構造と関連して、個別の磁場配位を越えて重要なテーマとなっている。RFPからはこれらに関連する発表がなされていた。

“3次元”について最後にもうひとつ言及すれば、NSFがサポートしてワシントン大学を中心に運営されている共同研究体“Plasma Science Center”では、ベクトル実験データを3次元表示するためのソフトウェアを開発しており、完成後は無料で研究者に公開されるとのことであった。初日のプレナリーで3D表示の迫りに圧倒されたこともあって、このようなプロジェクトは小規模研究室で研究を進めている実験家にとっては大変意義深いものであると思った。(政宗)

2. 基礎プラズマ

基礎プラズマ分野というカテゴリーで発表を眺めてみると、その範囲は大変広範にわたる。予稿集の目次を見て、基礎プラズマとつく分野を眺めてみると、「2流体、カオス、非線形現象」、「非中性、ダスト、複雑性、低温プラズマ」、「リコネクション」、「実験室宇宙物理、宇宙物理プラズマ」、「シミュレーション、乱流、輸送、流れ、シース、ショック」といったセッション名がつけられている。核融合関連分野のセッションに分類されていても基礎プラズマ関連の発表があれば、基礎プラズマ関連分野のセッションに分類されていても核融合プラズマ関連の発表である場合もある。このように、基礎プラズマ分野の範囲自体の定義があいまいなので、上にあげたセッション名以外に基礎プラズマ分野のセッション名があった場合にはご容赦願いたい。講演は、招待講演、口頭発表、ポスター発表、ミニコンファレンスに分類されるが、基礎プラズマ分野では、宇宙プラズマや太陽風プラズマ、プラズマ応用など含めて、レビュー講演が3セッション、招待講演が4セッション、口頭発表が7セッション、ポスター発表が5セッション、チュートリアルが1セッション(太陽コロナ質量放出に関する理論と観測について)、ミニコンファレンスが4セッション(太陽風乱流と、磁場核融合と宇宙物理系における運動量輸送についてそれぞれ2回のセッション)があった。今年のMaxwell賞は、メリーランド大学のJ. Drake教授が受賞した。その受賞講演では、プラズマにおける磁気リコネクションとそれに伴う粒子加速の理論およびシミュレーション研究のこれまでの成果がわかりやすく解説された。今年の発表の中で特に目を引いたのが、初日最初のセッションで行われた、カリフォルニア大学ロサンゼ

ルスのW. Geikelman教授によるレビュー講演である。宇宙・実験室プラズマ中におけるシア・アルフベン波に関する観測およびシミュレーション結果をわかりやすく講演されていたが、立体視用のプロジェクタを用意し、聴衆全員の席に偏光板を用いた立体視用眼鏡を配布して、実験装置や、複雑な磁力線構造やフロー構造などのシミュレーション結果や観測データを立体的に可視化して表現していた。また、予稿集の表紙にも赤と青のセロファンを用いた立体視の図が掲載されており、立体視を用いた発表が本格的になってきたのかと感じた。

APS-DPPはこのように、プラズマというキーワードの下、非常に幅広い分野の研究者が一堂に会して発表をするので、思わぬ分野の研究者と議論ができ、新しい発想を得ることができる。国内においても分野横断的な大きな会議を定期的に開催されるとうれしく思う。(大谷)

3. 慣性核融合・高エネルギー密度科学分野

この分野では、米国立点火施設(National Ignition Facility: NIF)の発表が質・量ともに他を圧倒していた。192本/1.8MJのレーザーと間接照射型ターゲットによる2011-2012年の点火・燃焼実証実験に向けて順調にデータを積み上げており、2010年9月にはDTクライオターゲットを用いて最大1.3MJでの統合実験がスタートした。コーン付きCDターゲットを用いた高速点火核融合実験では、米ロチェスター大学から1kJのOMEGA EPレーザーによって爆縮コアを追加加熱し、爆縮による中性子の4倍、 1.5×10^7 個の中性子発生が、阪大レーザー研からはLFEXレーザーの1ビームを用いた高速点火実験において、400Jの追加加熱による30倍、 3×10^5 個の中性子発生が報告された。いずれの場合も、追加加熱による中性子発生数は予想を下回っており、これは加熱レーザーのプレパルスによってスケール長の長いプレプラズマがコーン内に生成され、爆縮コアの加熱に寄与しないエネルギーの高い高速電子が増加し、加熱効率が低下したためであると考えられている。今後は加熱レーザーのプレパルスの低減が必要である。爆縮用レーザーの最後にエネルギーの大きなパルスを加えて衝撃波を励起し、それによって圧縮されたコアを点火する、衝撃波点火が新しい点火方式として注目されており、理論・実験両方からの発表件数が増加していた。また、NIFの4ビームを用いて10kJ、5psの高強度レーザーNIF ARCを建設し、間接照射型ターゲット高速点火の統合実験を2012-2013年に行うという計画が進められている。NIFでの間接照射型ターゲットによる点火・燃焼実証が確実視されていることから、高速点火や衝撃波点火等による、将来のレーザー核融合発電実現を見据えたコンパクトな核融合スキームの研究が精力的に進められていることが印象的であった。

世界の大型レーザーを用いた高圧物性、状態方程式、実験室宇宙物理等の基礎実験の発表件数も増加しており、単にレーザー実験でしか実現することのできない高圧状態を達成できたと言うだけではなく、計測器やターゲットの改良による質の高いデータが発表されるようになったとの印

象を持った。また、NIF では核融合実験と平行して基礎実験も予定されており、世界各国からの公募を経て、核物理、材料科学、宇宙物理等、8 件の実験提案が採択され、2012 年から実験が行われる予定であると発表があった。

大型レーザー関連の発表が多くを占める中、テーブルトップの高繰り返しレーザーを用いたプラズマ物理の基礎実験にも興味深い結果が多く見られた。一例として、宇都宮大学の湯上氏は、フェムト秒レーザーを用いて、伝搬する電磁波の振動時間よりも十分に短い時間にプラズマを生成することにより、入射電磁波の周波数が上昇することを

実験的に示した。通常プラズマ中で電磁波の分散関係が真空中と変わるのは、周波数は変わらずに波長が変わるためであるが、この実験では境界の影響のない大きなプラズマを瞬時に生成することにより、電磁波の波長は変わらず、周波数が変化することによって分散関係が満たされるのである。レーザーパラメーターの向上とともに装置が大型化するレーザー・プラズマの分野ではあるが、このようなアイデアに満ちた基礎実験のセンスを大切に、面白いきれいな実験、質の高いデータの取得を行う必要があると感じた。
(坂和)