

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。

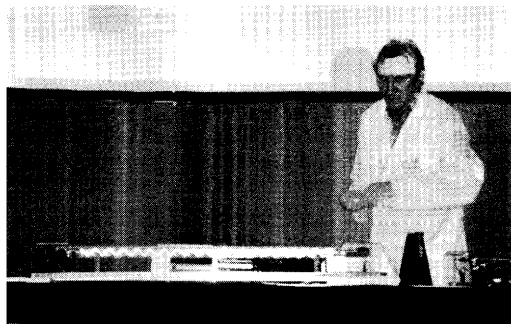
最後になりますが、本会議ではポスター発表の中から3件を選んで Best Poster Award を表彰することになっており、その1件に日本から M. Kono, M. Y. Tanaka, J. Vran-

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。

今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回がスダグ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(エミッションの均一性を向上させ、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が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な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る。

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、2.45 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。Kritzがコア, ペDESTAL, ELMの動力的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://bpsl.nucleng.kyoto-u.ac.jp/bpsl/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)