内外情報/会議報告

ボルガ川クルージングに集う

第2回「プラズマ中の大電力マイクロ波」国際ワークショップ報告

曄道 恭 (京都大学理学部), 出原 敏孝 (福井大学工学部)
大久保邦三 (核融合研), 佐藤元泰 (核融合研), 坂本慶司 (原研)

ニージニ・ノヴゴロッド (旧ゴーリキ) にある
応用物理研究所の主催で『プラズマ中の大電力
マイクロ波』に関する第2回国際ワークショップが
1993年8月15日から8月22日迄新生ロシアにて
開かれた。この会議の第1回目はソ連で自由化が
進行中であった1990年にスズダルで開かれてい
る。ニージニ・ノヴゴロッドには沢山の軍事工場
があり、かつては外国人立入禁止区域で、サハロ
フ博士が幽閉されていた地で有名である。プラズ
マの電子サイクロトロン加熱の高周波源として今
や不可欠となったジャイロトロンを開発した研究
所はこの地にある応用物理研究所であり、いわば
大電力マイクロ波管の研究者にとってはメッカと
いってもよい地である。

会議はモスクワを出発して応用物理研究所のあ
るニージニ・ノヴゴロッドまでの約1000kmをボ
ルガ川沿いの古い田舎町に立ち寄りながら往復す
る貸し切り大型観光船上で行われた。約1週間、
行けども行けども変わらぬ広大な大地を両岸に見
ながら、夜はボルガ川の彼方に沈む北国特有の遅
い落日と降るような星空のもとで7泊8日にわたり
船内で起居を共にした。期間中は主催者側の心配
りによる二日に一度のたそがれコンサートと3
時間程度3回の沿岸沿いの古都観光を楽しむこと
ができた。

参加者はロシア139名、ウクライナ7名、ドイ
ツ7名 (この内1名はITERの永島氏)、米国5名、
日本5名、フランス4名、英国3名、スイス2名、
スウェーデン2名、イタリア2名、オランダ2名、

フィンランド1名、イスラエル1名で総勢13ヶ
国、180名であった。同伴者を加えると250名近
くである。参加者は核融合、プラズマ物理のみな
らず、通信、環境問題に係る多方面のロシアの研
究者の参加があり、広範囲のマイクロ波関連の会
議となった。

船内の3つのホールで午前は全体会議として計
24編の招待講演、午後は3会場で並行した分科
会で招待講演19編を含む合計129編の発表がなさ
れた。会議の内容はH, D, N, Sと名付けられ
た4つの分科に分けられている。参考のため、全
分科での招待講演のプログラムリストを最後に示
す。分科名と発表論文数は

(H) 核融合装置のマイクロ波によるプラズマの 生成と加熱	17編
(D) マイクロ波放電とその応用	34編
(N) プラズマ中の非線形過程 (理論とマイクロ 波実験)	29編
(S) 大電力マイクロ波源の開発	49編

である。(S) 大電力マイクロ波源の開発の分科で
の発表件数が最も多いことが会議の特徴を如実に
表している。マイクロ波の環境問題への適用、プ
ラズマ化学への応用、イオン源、非線形波動等
を含む分科(D)と(N)ではロシア、ウクライナ以
外からの発表がなく、西側諸国の発表は大部分が
招待講演で、核融合装置に適用できる大電力ジャ
イロトロン、FEMの開発(S)とそれらのプラズ
マ加熱、計測(H)への適用に集中した。以下に
主な招待講演の概要を述べる。

(H) 分科では、永島が ITER での高周波加熱と電流駆動の計画で、20-90MHz の ICRF 加熱装置と ECH 用の 168GHz ($> 1 \text{ MW}$) の CW ジャイロトロンの開発計画があると話し、低域混成波電流駆動 (LCHD) はプライオリティが低いと述べた。Gomezano は JET の 3.7GHz/2 MW LH と 4 MW の ICRF での 2 MA 電流駆動の実験にて ICRF の 20% 以上の電力が高速電子に結合し相乗効果を作っていると述べた。Tonon は Tore Supra での OH + LHCD + ICRF の 9 MW の入射での閉じ込め時間が Rebut-Lallia-Watkins スケーリングに良く一致すると強調した。2.9 MW の LH 入射で電子密度 $2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ で 10 keV のピーク分布を示す。現在の電流駆動効率は $0.2 \times 10^{20} \text{ m}^{-2} \text{ A/W}$ である。Alikaev は最近 Nuclear Fusion 誌に掲載された T-10 での 83, 140, 160 GHz の基本波と第 2 高調波での加熱、電流駆動実験を述べた。曄道は WT-3 で LHCD プラズマでの熱拡散係数を多チャンネル軟 X 線で測定し、OH に比べて $1/2 \sim 1/3$ であると述べた。また、 $m = 2$ の MHD モード安定化が $q = 2$ のみならず $q = 1$ 面の ECH でも起こると強調した。Kasperek は W-7AS での 70 GHz と 140 GHz の ECH 実験を熱拡散係数測定と電流駆動、H-モード等について話した。Tuccillo は超伝導トカマク FTU でのジャイロトロンを発振源とした LHCD の装置の開発と初期実験の結果を述べた。大久保は ECH の大型装置 LHD への適用の具体案の概説と楕円ガウスビーム入射について円形ガウスビームからの新しい変換法を計算と実験結果から提示した。

(D) 分科では、Vikharev がナノ秒大電力マイクロ波の入射による大気上層部での人工電離層生成を環境問題オゾン生成と関連して言及した。Kossyi は環境問題と関連して塩素フロン炭素化合物 (CFC) の対流圏での洗浄をプラズマ化学の観点から実験とモデリングについて述べた。Sortais は ECR を用いた多価イオン源について、また Suvorov は相対論的電子を含む ECR プラズマの生成と応用を話した。Kutner は ECR イオン源のサイクロトロンへの適用についてロシアのド

ブナでの計画を述べた。Bykov はマイクロ波の応用としてのセラミックシンターリングについてグレインのサイズ、均一性を品質改善の観点から話した。

(N) 分科では、Gorbunov がプラズマビート波加速とレーザ・ウェーク場加速についてレビューした。Denisov は CARM, FEM, ジャイロトロンモード変換器、準光学伝送系についての研究の結果を述べた。Gildenburg は放電過程での電磁波の非線形過程についてレビューした。

(S) 分科では、出原が波長 0.47 mm (周波数 640 GHz) まで波長可変の中出力ジャイロトロンの開発とプラズマ散乱計測への応用を話した。佐藤はビーム・RF 分離型ジャイロトロンとひさし付きのヴラゾフ変換器内蔵型ジャイロトロン設計、更に真空窓材の開発、セラミックシンターリングの実験結果について述べた。Granatstein は TeV linear collider の駆動として周波数倍増ジャイロクライストロンで 9.88 GHz 入力で 19.76 GHz/27 MW/1 μs を得た。ロシアのジャイロトロン研究の現状を Goldenberg が話した。現在までの復習と 10s/CW 運転に向けての問題点と研究の項目を述べた。坂本は JEARI と東芝とのジャイロトロン開発にて 110 GHz/370 kW/0.3s を達成した結果を述べ、引き続きコレクターデプレッション方式の計画と極低温ウインドウの話題を述べた。Hirshfield は特殊な電子軌道でのジャイロクライストロンについて 13 次高調波で 140 GHz で数 MW の発振が可能となると提案した。Petelin は大電力マイクロ波を用いた新しいレーダと通信システムについて述べた。Sokolov は 100 μs でのジャイロクライストロンについて TE_{021} モードで 750 kW, 24 db, 24% 効率で得たと発表した。Verhoeven は FOM 研究所で開発中の 200 GHz の装置の構成、設計原理について述べた。12 A のビーム電流で 1 MW 出力のためには 250 GHz では 2 MeV, 125 GHz では 1.3 MeV 必要となる。矩形コルゲート導波管を用いた特殊な設計のアンジュレータについて詳述し、ITER への適用性を指摘した。この FEM は 1 MeV で加速し、0.8 MeV の逆電圧でエネルギー

回収するもので、当初は0.1秒、将来は連続運転を狙っている。ThummはKfKでの140GHz ジャイロトロン開発について700kW/5ms及び120kW/0.5sを達成したことと、隣り合う二つのTE_{9,4}とTE_{11,4}を用いてステップ・周波数同調を行った結果を述べた。

その他の一般講演から印象に残ったものを列挙する。IAPのBratmanがECHのための300GHz, 2.5MWのCW-CARM (Cyclotron Auto Resonance Maser)とプラズマ計測用の1.5THz, 0.5MW, 10 μ sのパルスCARMの開発計画について述べた。Zasyplin等はX-bandのジャイロクライストロンの実験結果について述べ、出力750kW, 増幅率20dB, 効率24%, バンド幅0.6%及び、出力150~250kW, 増幅率40dB, 効率48%, バンド幅1.5%が達成された。また、IAPでは液体窒素による周辺冷却の100mmサファイア窓を用いて140GHz, 285kW, 3秒までの入射を周辺部との温度差が50度で出来たと述べた。Kostrovはホイスラー波が自ら密度の溝を作りながらダクト伝播する奇麗な実験を述べた。プラズマは直径60cm, 長さ150cm, 密度10¹⁹から5 $\times$ 10¹⁵m⁻³, 0.3-0.5eVの高周波放電プラズマであり、ここへ大電力ホイスラー波を入射して実験している。単純ミラーでのECR放電プラズマの多価イオン源, エックス線源, シンクロトロン放射源への適用がロシアの多くの研究者からなされた。ECR放電の応用の一つとしてオゾン層の修復についての基礎研究の結果の発表があったが、副作用の心配が極めて大きいとのコメントが出た。

今回の会議でロシアのマイクロ波加熱・電流駆動の研究と高周波加熱技術開発の現状が大凡明らかとなった。前者はT-10の実験に限定されていて進捗度は低い、後者については主催する応用物理研究所におけるマイクロ波源の開発と応用の研究内容は素晴らしい感がある。ロシアは大電力マイクロ波源とりわけジャイロトロンのセラミックシンターリング装置やECRプラズマによるダイヤモンド薄膜形成, レーダ通信, 環境問題等への一般分野の応用にも熱意を示していた。現在、応用物理研究所のジャイロトロン開発グループは

ジャイロトロン開発での技術提携あるいは共同研究を介して西側諸国から研究費を導入し易い状況にあり、また彼らのカリスマ性を利用して諸外国の研究者をこの会議に招聘し、研究所の資金援助のもとで旧ソ連圏全体からマイクロ波に限らずプラズマ研究者多数を呼び集め、研究の活性化を謀ろうとしているように思えた。全ての講演を聞いたわけではないが、前回の西側諸国の関連分野の研究者がロシアの高効率モード変換器の成果に驚嘆した如き画期的な発表は残念ながら今回はなかったように思われる。注目すべきことの一つは、ジャイロクライストロンの実験研究の着実な進展であり、間もなく実用段階に入るのは確実と思われる。我が国の立ち遅れが心配される。最後に、大久保、嘩道の両名は文部省国際研究集会の費用で会議に派遣されたことを付記して謝意を表す次第である。

INVITED TALKS

Plenary Sessions

- T. Nagashima: High-power RF heating and current drive experiments planned for ITER
- C. Goromezano: High power lower hybrid current drive on JET: results and prospect
- G. Tonnon: RF heating and current drive on Tore Supra: status, results and approach to stationary discharges
- V. V. Alikaev: ECR heating and current drive on T-10
- Granastein: A comparison of microwave amplifiers for driving TeV linear colliders (with emphasis on frequency doubling gyrokystrons)
- A. L. Goldenberg: State of the art of gyrotron investigations in Russia
- K. Sakamoto: Development of a high power gyrotron for fusion application in JAERI
- L. M. Gorbunov: Laser wake-field accelerator
- G. G. Denisov: Microwave systems for high-power gyrotrons and free-electron masers
- V. Kasperek: Recent results on ECRH and ECCD from W7-AS
- A. A. Tuccillo: 8GHz LH heating experiments on FTU
- A. L. Vikharev: Nonequilibrium plasma produced

- by microwave nanosecond radiations parameters, kinetics, practical applications
- I. A. Kossyi: Experimental and mathematical modeling of plasma-chemical methods for troposphere cleaning from chlorofluorocabons
- V. B. Gildenburg: Nonlinear dynamics of electromagnetic wave beams and wave packets in gas breakdown processes
- J. L. Hirshfield: High-power mm-wave harmonic converter for plasma heating and control
- M. J. Petelin: High-power microwave radars and communications
- L. G. Popov: Gyroklystrons-millimeter wave amplifiers of the high power
- M. Thumm: Development of high-power 140 GHz gyrotrons for fusion plasma applications
- A. G. A. Verhoeven: The 200 GHz FOM-Fusion-FEM
- P. Sortaris: Electron Cyclotron resonance ion sources for production of multicharged ions
- E. V. Suvorov: Production and application of ECR plasma discharge with relativistic electron component
- V. B. Kutner: Status and evolution of ion sources DECRIS and prospects of ECR ion sources coupling to FLNR accelerators
- Yu. Bykov: Ceramics sintering using millimeter wave radiation
- K. Ohkubo: Development of ECH systems for large helical device at NIFS
- Creation and Heating of Plasma by Microwaves in Fusion Devices*
- Y. Terumichi: Transport study and MHD control by local electron cyclotron heating in the WT-3 tokamak
- J. A. Hoekzema: Alpha particle diagnostics using 140 GHz microwave scattering on JET
- Microwave Discharge and its Applications*
- G. M. Batanov: Super-pure plasma chemistry in discharge excited by intense microwave beams
- Yu. A. Lebedev: Microwave or DC plasma chemical reactor? State-of-the-art
- D. Anderson: Breakdown induced erosion of high-power microwave pulses
- A. A. Scivirida: Investigation of ECR discharge in a baseball and cusp magnetic fields with the use of gyrotrons
- Non-Linear Processes in Plasmas (Theory and Microwave Experiment)*
- N. S. Erokin: Dynamics of longitudinal wave damping under acceleration of trapped particles in inhomogeneous plasma
- G. M. Fraiman: Wave-beam interaction in the presence of inhomogeneous static electric and magnetic fields
- Y. Ben-Aryeh: Phase conjugation in plasma
- N. A. Bogatov: Experimental investigation of millimeter-wave phase conjugation via four-wave mixing in nonlinear media
- A. S. Sakharov: The theory of stimulated Ramans scattering for high brightness lasers pulses in an underdense plasma
- V. N. Budnikov: Correction and time-delay enhanced microwave scattering diagnostics for studying the nonlinear wave phenomena in plasma
- A. S. Kingsep: Detection of HF signal by the plasma layer
- Development of High-Power Microwave Sources*
- T. Idehara: Development of submillimeter wave gyrotrons
- V. L. Bratman: Cyclotron autoresonance masers: achievements and prospects of advance to the submillimeter wavelength range
- N. S. Ginsburg: Free electron lasers with guiding magnetic field: theory and experiment
- G. S. Nusinovich: Tunable sources of microwave radiation
- S. D. Korovin: High-power high-repetition-rate microwave oscillators
- A. A. Rukhadze: Recent progress in plasma microwave electronics
- K. G. Gureev: Study of plasma producing and the amplification of waves in a hybrid beam plasma microwave device
- Y. Carmel: Relativistic plasma microwave electronics: studies of high power plasma filled backward wave oscillators