



## ■会議報告

### 第13回高温プラズマ計測会議

核融合科学研究所 須藤 滋, 磯部光孝,  
パイロン・ピーターソン, 大館 暁, 田中謙治, 徳沢季彦  
大阪大学 藤田和久

#### 1. 始めに (須藤)

第13回高温プラズマ計測会議は2000年6月18日から6月22日まで、米国アリゾナ州のツーソン市で行われた。基本的には米国の研究機関の主催ではあるが、十数ヶ国から200名余りの参加者であった。今回、ロスアラモス国立研究所のCris W. Barnesが実行委員長を務めた。本会議は2年ごとに開催されており、磁場閉じ込め方式、慣性核融合方式、宇宙プラズマ、天体物理学、工業応用に至る幅広い分野でのプラズマ研究者が集まり、高温プラズマの計測法と計測装置の開発について相互に課題となっている点について招待講演とポスター発表により討議するスタイルをとっている。これらの成果はRSIに正規論文として刊行されることになっている。

会議運営は全般的に良好であった。口頭発表による招待講演と一般参加のポスター発表との2部構成で、それらが重なることはないで、すべての参加者が議論・情報を共有できる。日本からの招待講演は今回1件だけだったのでもう少し増やすよう会議主催者に申し入れを行った。次回には考慮するとの返事をBarnesから受けた。今回は2002年にウイスコンシンのマジソンで開催と決まった。実行委員長はFonck教授である。

以下の章に分野別に分担して概要をまとめた。私の関係した磁場閉じ込めプラズマの分野では、輸送研究はいまだに核融合研究の最重要課題の一つであるが、そこで計測の果たすべき役割は大きく、特に、

- (1)L-H遷移に関する計測,
- (2)反射計やECEイメージングによる揺動の二次元計測 (さらにこれを組み合わせたトモグラフィ手法による三次元計測),
- (3)多層膜ミラーを使った軟X線分光などX線領域の分光計測, X線CCDカメラ計測開発,
- (4)トムソン散乱計測は手法が確立した感があるが, 発表

author's e-mail: sudo@LHD.nifs.ac.jp

件数はいまだに十数件あり、実機建設・稼動では工夫のしどころがまだあることを反映しているのだろう。

(5)炭酸ガスレーザーやジャイロトロンを用いた協同散乱計測,

(6)レーザー誘起蛍光法による揺動計測

など多くの取り組みが発表された。また、核反応生成物の計測の進展も着実に進んでいるとの印象を受けた。

なお、日本原子力研究所の杉江達夫氏をはじめとする方々に本報告についてのコメントをいただいたので、ここに感謝いたします。また本報告全体の文責は須藤が負っております。

#### 2. 慣性核融合に関する計測開発 (藤田)

慣性核融合では、米国が進めている1.8メガジュール/192ビームNIF (National Ignition Facility) プロジェクトに関連する発表がやはり多かった。そのスケジュールの概要はロスアラモス国立研究所 (LANL) T. Murphy のNIFにおける核計測に関する招待講演の中で示され、ファーストライト2004年7月、中性子発生2006年4月、192ビーム完成2008年7月、そして点火2010年後半であった。仏国で進められている同様のプロジェクトLMJ (Laser Mega Joule) もほぼ同時期の2008年完成予定との報告があった (Bourgade)。これらの計画からみるに診断技術開発の時間的余裕があるのか、本会議および引き続き行われたNIF diagnostics Workshopでは、一部は先行してプロトタイプのパフォーマンス試験等がなされているものの、仕様の確認や計測項目の洗い出し、担当者の振り分けを行いながら、様々なアイデアについて議論を深めている段階であった。計測項目は、中性子を中心とした核計測、X線スペクトル・画像計測、衝撃波観測、ホーラム温度観測など、従来からある一連の計測技術をよりスケールアップした形が基本となっている。従来よりレーザー出力が増すことで生成されるプラズマが大きく持続時間も長いと、時間・空間分解能への要求も緩和され、また信号強度も大きくなるため計測としては楽な方向ではある。これにより、例えば標準計測とは成り得ていなかった核反応領域の観測を目的とした、ピンホール (米) や半影法 (仏) による中性子イメージングの設計が精力的に進められている。これに対し、多量の中性子発生 (~

$10^{19}$ /shot)に起因する検出器のノイズ増やホーラムのデブリといった新たな技術的問題や、観測対象の高エネルギー化による診断技術の質的变化がポイントであろう。従来keV程度であったX線影絵法に用いるバックライトスペクトルは対象プラズマの面密度の増加により10 keV以上が必要とされている。爆縮コアプラズマの診断では、二次元温度分布観測を目的として7年前に日本(大阪大学)で初めて導入された二次元湾曲結晶を用いた単色X線画像法による診断が主計測として位置づけられている。観測対象は燃料中のドーブ物質を従来のアルゴンからクリプトンへと同様の理由で変えることでより高エネルギーのX線にシフトし、これにスペクトル計算の理論家に対応する動きを見せている。これらも含め標準スペクトル計測器としては0.1~20 keVをモニタできるものをすでに用意している。一つ特記すべきは、米仏間で計測器の相互利用ができるように仕様を一致させ、かつ上記中性子イメージングの例にもあるように相補的な開発協力体制をとっていることである。英も一部開発に参加しており、両プロジェクトがこれら協力体制のもとに効率よく走れば、点火物理の解明に大きく貢献するであろう。

### 3. ECE, 反射計など (徳沢)

プリンストンのG. Taylorによる“Electron Bernstein Wave Electron Temperature Profile Diagnostic”という講演では、高密度低磁場装置における電子温度計測として、光学的に薄いECEよりもEBW計測の方が利点があるという内容であった。次の講演ではUCLAのM. Gilmoreにより内部磁場強度計測へのdual(O-X) mode 相関反射計の適用について発表が行われた。入射するマイクロ波の周波数をO-modeは固定しX-modeは掃引することにより相関が一番高い周波数がright-handのカットオフ周波数に対応することから、密度分布が既知であればその位置の磁場強度がわかるというものであった。次に電子温度の二次元計測をめざしたECEイメージングについてUCDのB.H. Dengより現在の開発状況について発表が行われた。GaAsのショットキーバリアダイオードを検出器とする16ch(4×4)のボウタイアンテナをアレイ化したシステムでRTPおよびTEXTORにて適用を行っている。

反射計計測では、1) 高速周波数掃引が可能な発振器HTOを用いたbroadband FM反射計による密度分布計測が種々の装置(ASDEX-U, DIII-D, Tore Supra, NSTX)で適用されていた。この発振器は全周波帯域を10 μsで掃引可能であり、繰り返し周波数も100 kHzで稼働可能な

ものである。プローブ周波数は、ソースの周波数(8-12 GHzまたは12-18 GHz)を過倍して得られる。ASDEX-Uでは110 GHzまでの過倍化に成功している。分布計測は、LFSまたはHFSから行いH-mode形成時の内外の分布の違い、ITB領域での急峻な密度分布などが発表されていた。また、高速掃引に伴う高周波IFの信号処理に関しても様々なアプローチが行われ、シミュレーションとの比較がなされていた。2) マイクロ波をパルス化し飛行時間計測を行うパルス反射計(パルス幅1 ns程度)は、多チャンネル化することにより密度分布計測と揺動計測が同時に行えるという利点を持つ。TEXTOR-94で18-57 GHz間を10 ch化で試みていた。また高い磁気シアによるモードの混在する影響を除去できるためLHDにおいても適用されている。3) 超短パルス反射計は、パルス幅65 psのインパルス発振器を用いたものがSSPXとGAMMA10から発表され、SSPXでは、バランスドミキサをアップコンバータとして用いることで33-158 GHz間の48 chのシステムを構築していた。空間分解能は4 mmである。GAMMA10では、cross-polarization scatteringによる内部磁場揺動計測に超短パルス反射計の適用を試みていた。4) 反射計による揺動計測としては、W7-ASよりドップラー反射計が提案されていたのが新しい。入射/受信アンテナの上下に別の受信アンテナを設置し $E \times B$ 回転に伴うスペクトルのドップラーシフトを計測するものであり、電子ルートへの分岐が生じたことによると考えられる $v_{\perp}$ の変化が観測されている。

ECE計測に関する発表ではマイクロ波イメージングに関するものが多くなされた。イメージングに必須素子の検出器アレイとしては、UCDにおいてGaAs基盤上にボウタイアンテナを蒸着しショットキーバリアダイオードを検出器とする16チャンネルのものが開発されている。TEXTORに適用されたイメージングシステムでは1 cm程度の空間分解能のものが得られており、電子温度分布だけでなく揺動計測への適用も視野に入れていた。一方LHDへの適用を進めているイメージングシステムでは、MMIC技術を利用したIFアンプまでを基盤上に蒸着するタイプのアンテナアレイが開発されている。またイメージング技術の反射計への適用に関する発表が行われた。発振器としてバラクタダイオードをアレイ状にしたハイパワー発振かつ放射方向を可変にしたものが開発されている。三倍過倍器も含有した1×8(一次元)4×4(二次元)アレイが製作され、出力としては63 GHzで410 mW、96 GHzで77 mWのものが得られている。従来からの多チャンネルラジオメータの発表では、相関解

析によるプラズマ内部 MHD 揺動波数計測や 2 倍と 3 倍高調波との比較による non-thermal electron の速度分布関数の計測などがあった。

プローブ計測では、効率的な RF 加熱および粒子閉じ込めのためのアルヴェン波の計測が GAMMA10, CHS, DIII-D よりなされた。プローブアレイを用いた MHD 揺動および微視的内部磁場揺動に関する計測が RFX, CHS, PEGUSUS, MAST, DIII-D, H-1 等から発表された。

#### 4. 計測総合、高速中性粒子など (ピーターソン)

IPP Karkov, Ukraine の Voitsenya が燃焼プラズマ計測におけるプラズマ対向ミラーについての報告を行った。種々のミラー材質の反射率に対する重水素によるスパッタリングの効果などを調べた。次に核融合科学研究所の Sudo が LHD での三次元構造プラズマへの計測のチャレンジと定常プラズマへ向けた計測の取り組みに関する招待講演 "Overview of LHD Diagnostics" を行い、コメント・質問などがいくつもあり、好意的な反応を得ていた。この分野では 45 のポスターがあり、データ解析 7 件、データ収集 6 件、計測技術 5 件、計測総合 6 件、HIBP 8 件、中性粒子ビーム計測 5 件、高速中性粒子計測 4 件、高速イオン計測 4 件という割り振りであった。特に、ITER-FEAT 関連の計測、コヒーレントなレーダーを用いた NSTX 真空容器の 100 ミクロン内の精度を持つ計測、TJ-II ステラレータのプラズマ周辺部を計測するための Li や He のビームプローブなどが注目された。

#### 5. 核反応生成物・高速イオン (磯部)

磁場閉じ込め核融合に関しては、必然的に大型装置からの発表が多く、トカマクでは JET, JT-60U, NSTX, ヘリカルでは LHD, W7-AS から数多くの発表があった。その中でも特に印象深いのは、Uppsala 大学 (Sweden) にて以前より開発されてきた 14 MeV 中性子スペクトロメータ: Magnetic Proton Recoil (MPR) スペクトロメータである。このスペクトロメータの基本動作は以下のようである。D-T プラズマ中で核燃焼により発生した 14 MeV 中性子を CH<sub>2</sub> 箔に衝突させると、その箔からほぼ同じ程度の運動エネルギーを持つ反跳陽子が飛び出してくる。この反跳陽子を磁場スペクトロメータの中に導くと、反跳陽子はラーモア半径の大小によりその運動エネルギーの選別を受ける。これらの反跳陽子を最終段のホドスコープにてエネルギー別に検出してやることにより、最終的に中性子エネルギースペクトルが得られる。このスペクトロメータは、サイズが必然的に大きくなってしまふという欠点はあるが、エネルギー分解能および

計数率はすぐれた性能を發揮している。MPR スペクトロメータは JET にインストールされ、1996 年より稼働を開始している。これまでにバルクプラズマのイオン温度や、スペクトルの歪みから得られるプラズマ中の高速イオンのエネルギー分布の情報のみならず、スペクトルのドップラーシフト分からバルクプラズマのトロイダル回転をも得ることに成功している。また、日本原子力研究所東海より人工ダイヤモンドを用いた D-T 中性子スペクトロメータの開発について報告があった。ダイヤモンド検出器では、14 MeV 中性子とダイヤモンド中のカーボンとの核反応により作られるパルス波高分布の広がりから D-T プラズマのイオン温度が推定される。天然ダイヤモンド検出器を使った中性子スペクトロメトリは、TFTR にてすでに実績があるが、天然ダイヤモンド検出器は生産性が低く、検出器が高価になるという欠点がある。人工ダイヤモンドにて天然と同等の性能を發揮することができれば、コストの点のみならず、D-T 中性子や荷電交換高速中性粒子のプロファイル測定が容易に可能となり、数多くの有益なデータを得ることができる。現状では、ダイヤモンド固体中での電子の予想以上のトラップに悩まされており、さらなる基礎・開発研究が必要であるようだ。

また、W7-AS, NSTX からは、それぞれシンチレータ板 (ZnS), ファラデーカップを用いた軌道損失高速イオンの直接測定についての発表があった。閉じ込め磁場構造に起因する高速イオンの軌道損失が懸念され、それが、この計測の重要性を担当者に改めて認識させている。W7-AS で使用されているプローブは、元々 TFTR, CHS で用いられてきたモノと同じタイプのプローブで、損失高速イオンの衝突により ZnS 板上に現れるシンチレーション光の分布から、損失高速イオンのエネルギーとピッチ角を同時に知ることができる。ICRF 加熱時の損失高速イオンの増加、MHD 振動に誘起される高速イオン損失等が観測されている。NSTX にて計画中のファラデーカップ型は、エネルギー弁別に難があるが、比較的安価に製作できるというメリットがある。

JT-60U では D-<sup>3</sup>He 放電時に発生する 16.7 MeV のガンマ線を、密度が高いことで知られるシンチレータ: BGO (Bi<sub>4</sub>Ge<sub>4</sub>O<sub>12</sub>) で測定し、D-<sup>3</sup>He の核出力を評価している。JT-60U では、<sup>3</sup>He ターゲットプラズマに重水素ビームを入射している。この場合には、ガンマ線測定が D-<sup>3</sup>He の核出力を評価する唯一の方法と言ってもよい。

#### 6. X 線計測 (大館)

磁場閉じ込めの装置での X 線計測では、分光器やパルス

ハイトアナライザに代表されるスペクトル分析を志向した装置と、トモグラフィ測定等の空間構造の測定を志向した装置が独立して使われてきた。今回の会議では、両者の測定法の間隙を埋め融合するような測定、つまり、エネルギー分解した状態での高空間分解能測定法が数多く提案・報告されていたのが目についた。たとえば、Be/Tiのフィルムを使った吸収法で、軽元素からの(CVI, CV)放射強度分布をCDX-U装置で、トモグラフィ測定している(V.A. Soukhovskii, CP26)。同様の手法でArXVIIのK $\alpha$ 線の空間分布がDIII-Dでも測定されている(I.N. Bogatu, GP3)。エネルギー分解に多層膜反射鏡を使った例としては、TEXTORでの例(L.A. Shmaenok, GP5)、CHSでの例(S. Duorah)があげられる。新しいスペクトル分析の手法として、シリコン検出器の前面に厚さの異なる酸化膜を形成してエネルギーを分別しているGAMMA10での計測も興味深い(R. Minami, GP4)。

計測の過程で二次元検出器が活用されているのも大きな特色である。上記の諸装置でも有効利用されているが、接線からのX線像の直接のイメージング装置が、LHD(Y. Liang, CP20, S. Ohdachi, CP22)、NSTX(D. Stutman, CP24)、PEGASUS(K. Tritz, CP27)、Alcator C-MOD(可視域, E.S. Marmar, EP8)等で実現あるいは計画されており一つの流行であった。

#### 7. レーザー計測など(田中)

FOMのDonneより、TEXTORでの新しい計測の紹介があった。DonneのグループはオランダのRTPトカマクで長い間先進的な計測を開発してきた。それらRTPで開発してきた計測装置(CCDを使った多チャンネルTVトムソン、二次元揺動計測をめざしたECEイメージング、局所的な密度分布の測定をめざしたパルスレーダー反射計)をTEXTORに設置し、計測を開始した。特にRTPで発見されたECH加熱時の電子温度のフィラメンテーション構造はTEXTORでも測定されており、これがRTP特有の現象でなく、ECHの局所加熱により引き起こされる一般的な現象だということを示した。また、

上記のほかにUC Davis, PPPLとの共同研究において反射計を使った電子密度揺動を測定対象とした二次元イメージング測定装置を設計中であり、またMITとの共同研究ではジャイロトロン協同散乱による高速イオンの速度分布関数の測定も開始した。後者については高速イオンによる散乱信号を取得したとの報告があった。

ポスターセッションではレーザー計測(トムソン散乱、干渉計、偏光計)についての報告があった。CO<sub>2</sub>レーザー協同トムソン散乱については、JT-60U(近藤)とオークリッジ国立研究所(Richards)との共同研究により、準備が進展している。また、偏光計については電子密度の測定を目的としたもの(LHD東工大(飯尾, 秋山)、JT-60U(河野)、NSTX(Park))と電流分布の測定を目標としたもの(FTU(O'Gorman)、MST(Brower))の2種類の報告があった。偏光計による電子密度測定は元々ITERで信頼性のある密度モニタとしてPPPLから提案されたものであるが、NIFS, JT-60Uの日本勢が先駆けて実験データを報告していた。偏光計は最初にTEXTORで電流分布測定のために始められたものであるが、現在のところ、DIII-DやAlcator C-modなどでは偏光計でなくMSEを用いた磁場測定がされている。DIII-DではMSEのデータから100 msecごと(必要があれば20 msec)ごとに磁気面形状が測定され密度分布や温度分布を磁気面関数で取り出すことができる。圧力分布を用いて繰り返し計算により磁気面を求める手法から、容易に計算できるということであった。CO<sub>2</sub>レーザーを使った干渉計はLHD(田中)とFTU(Canton)から報告があった。田中らのデザインが幅広いシートビームとディテクタアレイでチャンネル数を稼ぐのに対しCantonらの手法は細いビームを数kHzでスキャンさせ連続的に分布を測定する手法であった。いずれもまだ、テストベンチで試験を始めたばかりであり、アイディアの有用性はデータを取得して始めて明らかになるであろう。

(2000年7月10日受理)