



■第21回 IAEA 核融合エネルギー会議

嶋田道也 (原子力機構), 井手俊介 (原子力機構),
藤澤彰英 (核融合研), 小野 靖 (東京大学),
横山雅之 (核融合研), 長友英夫 (大阪大学),
榎枝幹男 (原子力機構)

第21回 IAEA 核融合エネルギー会議が2006年10月16日から21日まで、中国四川省の成都 (Chengdu) で開催された。会議参加者は約600人で、110件の口頭発表と430件のポスター発表で構成されていた。以下に、本会議における各分野の発表内容を報告する。

1. 磁場閉じ込め

(1) ITER

ITERはサイトが決定され、首脳陣が選出された。ITER協定が11月に調印されると、ITER機構が発足し、ITER建設準備が長足の進歩を遂げる。設計レビュー委員会がまもなく開始される。ITERの第一壁の交換を一年以内に行えるようにすること、乱流およびアルファ粒子の損失の計測を整備すること、総合的シミュレーション・コードを整備することなどの必要性が指摘された。

ディスラプションに伴って真空容器内の機器および真空容器が受ける電磁力は設計目標の範囲であるが、裕度が小さい。また熱負荷によってディスラプション一回あたり30 μm 程度ベリリウム第一壁が溶融する可能性がある。デモ炉においては、ディスラプションの影響はさらに増大することが予測されるため、ディスラプションはほとんど起きないことを想定している。したがって信頼性の高いディスラプション対策を確立し、ITERにおいて実証することが不可欠である。

ELMの対策として、 $n=3$ の外部磁場を加える手法がDIII-Dで試行され、 q_{95} が3.7以上の放電においてELM安定化に成功している。そこでITERとJETにおいてコイル設置の可能性の検討が行われた。真空容器の外側にコイルを設置した場合、必要なコイル電流がITERでは600 kA、JETでは400 kA程度となる。仮にブランケット・モジュールにコイルを設置すると、必要なコイル電流は25 kA程度となる。しかしながら、このオプションではディスラプションにおける電磁力がさらに厳しくなるなどの技術的困難が指摘されている。

JT-60Uの成果を外挿するとITERにおけるトリチウム保有量の予測値は減少するが、この予測には不確実性が大きく、トリチウム保有量の制御は依然重要な課題である。ITERにおいては、プラズマ対向材料にベリリウム、タングステンおよび炭素繊維強化材を組み合わせることで炭素の使用量を極力制限しているため、化学スパッタリング量が抑えられ、トリチウム保有量が低減できるこ

とが期待される。一方、ベリリウムとタングステンが合金を生成すると融点が低くなるが、タングstenは熱流束が小さい部分に使用を制限しているためこの効果の影響は小さいと考えられる。

中性粒子同士の衝突を考慮したダイバータ輸送計算によると、ダイバータ特性は、ダイバータ形状およびダイバータからの中性粒子の漏洩に、強く依存しない。この成果により、ダイバータ形状および運転の自由度が広がると期待される。

赤道面付近で異なるポロイダル位置に設置した3個の磁気センサーの信号を組み合わせることにより、抵抗性壁モードの制御性を改善し、ITERにおいて、ほぼ理想壁限界までベータ値を増大できることが理論的に示された。また、回転速度による安定化効果が期待できない領域においても、抵抗性壁モードが安定化できることが実証された。

プラズマ統合制御システムを開発することにより、電子サイクロトロン電流駆動による新古典テアリングモードが確実に安定化できるようになり、さらに、ELMが発生している場合においても、抵抗性壁モードを、物理モデルを用いた制御ロジックで安定化できるようになった。

ITERの機器保全および基本制御のための計測は要求を満たすことが可能であるが、高等な制御、および物理研究のための計測には要求を満たすことが困難なものがある。

(嶋田)

(2) トカマク実験

トカマク実験に関する論文は約140件であった。これは、実験に関する論文約210件のなかで大きな割合を占めている。論文発表の一番手を飾ったのは、開催国中国の(ポロイダル磁場コイルも含めた)フル超電導トカマク「EAST」の初期結果に関するものであった。超電導コイルをすべて国内で巻く等ほぼ純国産のフル超電導トカマクのファーストプラズマを、中国は本会議に間に合わせる事ができた。非常に順調に組み立て工程をこなしていったといえ、中国の核融合研究に対する意気込みを感じさせる。

さてまずプラズマ開発に関してであるが、JT-60UでのITERハイブリッド運転クラスの高規格化ベータ(β_N)=2.3の23秒維持、JETやASDEX Upgradeでの低 q_{95} (3-3.2)での $\beta_N=3$ の達成、DIII-Dでの壁なしのベータ限界を50%超える $\beta_N=4$ の2秒間維持等の報告がありITERでの先進運転やそれ以降のプラズマを見据えた高ベータプラズマ維持の研究は着実に進んでいる。実験結果のITER先進運転への外挿に関してもDIII-D、ASDEX Upgradeなどで行われており、ITERの正式な始動を間近に控えてITER、特にそのハイブリッド運転をめざした研究の比重が高まってきた。

ITER標準/先進運転、さらにその先の定常トカマク炉における高性能プラズマの能動制御に関連する発表も多くみられた。特に電流分布制御が重要となると考えられており、JT-60U、JET、Tore Supra等から実時間の電流分布制御について報告された。また、先進運転でキーとなる周辺電流駆動にむけ、特に中性粒子ビーム(NB)による周辺電流駆動についてその可能性や不安定性の影響等多く議論さ

れていた。

プラズマ制御に関連しては「プラズマのトロイダル回転」というキーワードについての発表が特徴的であったと言える。従来からプラズマ電流に対して順／逆接線方向および垂直方向の種々のNB入射装置を持つJT-60Uがトロイダル磁場リップルの低減により更にプラズマ回転のダイナミックレンジを拡げ、回転と閉じ込め／ペDESTAL特性およびMHD安定性について新たな成果を示す一方、DIII-Dにおいても、従来すべて一方向であった接線NBラインの一部を反転させる改造を行い、JT-60Uと同様にプラズマの閉じ込めやMHD安定性への影響に関する報告を行った。プラズマの閉じ込めとの関連については、トロイダル回転が順方向に増えると（逆方向に回転している場合に絶対値が小さくなることも含む）閉じ込めが良くなるということが双方の装置から報告があった。自発的なトロイダル回転および外部からの回転トルク入力が小さいと予測されるITERや核融合炉で燃焼プラズマの閉じ込め性能の理解に向けて、そのメカニズムや定量化については今後の研究の進展が期待される。回転についてはこの他、外部から角運動量を注入するNBや注入しない高周波といった追加熱を行った場合の回転の振る舞い、あるいは自発的に回転が変わる場合の振る舞い等多くの報告があった。

一方MHD安定性への回転の影響については、抵抗性壁モード（RWM: Resistive Wall Mode）とトロイダル回転に関しても興味深い報告があった。RWMの安定化は先進トカマクで必要とされる高ベータを得るために不可欠であるが、その安定性はプラズマのトロイダル回転に大きく依存することが知られている。しかし前述のようにトロイダル回転が小さいと考えられるITER等を考えたとき、どの程度の回転速度で安定化できるかは大きな問題である。今回のJT-60UとDIII-Dの報告で、従来実験的にみられていたものよりかなり小さな速度でもRWMが安定化でき得ることが示された。さらにアルヴェン速度で規格化したその値は（符号は異なるが）両装置でほぼ同じ値であることが示された。燃焼プラズマでのRWMの安定化に対して喜ばしい結果である。これらの2装置に限らず、今回の核融合エネルギー会議ではRWMに関連した実験／理論の報告が多くなされ、トカマクの高ベータ運転により関心が集まっているとともに具体的なアプローチが示されてきていると言える。

この他、閉じ込めに関して、密度分布のピーキングについてJET, ASDEX Upgrade, TCV等のデータからITERの密度分布がピーキングするという予測に関する報告があった。不純物の蓄積と関連して今後重要な研究課題である。

MHDに関しては、RWMとならんで、新古典テアリングモード（NTM: Neo-classical Tearing Mode）に関する関心が引き続き大きい。RWMについては今回特に発表が増えた感があるが、NTMについてはここ数回の核融合エネルギー会議で関心を集めていた。電子サイクロトロン波電流駆動（ECCD）によるNTMの抑制実験について、磁気島と共鳴位置／幅等の相対関係等についてさらに詳細な実験が

JT-60U, ASDEX Upgrade, DIII-D等で行われ、理論による実験の理解も進んだ。

ELMに関しては、今回は特にELM吐き出し時にフィラメント状の構造が観測（高速テレビ等による）されるという報告がMAST, JT-60U, JET, DIII-D, ASDEX Upgrade, NSTX, Alcator C-Modから広くなされていた。一方ITERで重要だと考えられるELM mitigationに関しては前回に引き続き、ペレット（ASDEX Upgrade）や外部コイル（DIII-D）を用いた実験結果が報告されていた。

プラズマ壁相互作用に関しては、ASDX Upgradeで下ダイバータのストライク点付近を除く第一壁の85%をタングステンで覆った結果について報告があった。タングステンの蓄積量は周辺局在モードの周波数をペレット入射によって制御した場合や中心加熱のパワーを調整した場合には許容できる範囲内に維持することができた。また、第一壁がすべて金属（モリブデン）であるAlcator C-MODからも不純物等に関して報告があった。先の密度ピーキングの話とあわせて、タングステン壁を予定しているITERへの外挿が重要となろう。他にFTUの液体リチウムリミタの初期結果等、壁材料に関する報告があった。また、H/D/Tの蓄積については前回に引き続き関心が高く、蓄積量やその壁温度依存性、蓄積場所に関してJT-60U, DIII-D, Alcator C-MOD, Tore Supra等から報告があった。

このように、今回も広範囲の研究分野でその理解が進展していると感じさせる会合であった。今まさにITERがスタートしようとするところで、研究の焦点としてITERがより明確なターゲットになってきているのは間違いなさであろう。次回会合では、ITER、特にその先進運転およびさらに先のプラズマを見据えたプラズマ領域の拡大、それと平行した基礎的物理解研究での進展を期待したい。（井手）

(3)ヘリカル系実験

ヘリカル系についてはLHDのオーバービューをはじめとして38件の発表があった。ヘリカル系主力装置であるLHDからは、新しい高密度運転領域（Super Dense Core）の発見、高ベータプラズマの達成（体積平均ベータ値4.5%）、また定常運転（放電時間54分、積算入力エネルギー1.6GJ）の記録更新が主要成果として報告された。ここで、Super Dense Core（SDC）放電は、Local Island Divertor（LID）による周辺領域の中性粒子の能動的制御とペレットによるプラズマ中心への粒子補給によって得られ、きわめて高い中心密度 $5 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ が達成されている。磁場閉じ込め全体として特筆すべき成果である。

LHDからは、まず、SDCや高ベータ放電に至る詳細、LIDによる中性粒子と壁の制御、高密度領域での物理的に興味深い現象（デッタチメントなど）、高ベータ領域におけるMHD特性などが個別に報告された。また、トカマクではGentle's cold pulseとして知られている、プラズマ周辺の冷却と同時に中心部の温度が上昇する現象がLHDで明瞭に観測された。W7-ASには同様な非局所輸送を示唆する現象は見つかっておらず、プラズマの非局所性に関する知見を与えているとともに周辺制御による中心制御の道を開いている。その他、多チャンネル軟X線観測が進展し鋸歯

状波振動の内部発展の様子が示される他、SOLでの揺動の詳細な研究が報告されていた。SOL領域での揺動観測からは、トカマクで近年盛んに研究されているブロップを示唆する時空間構造をもつ揺らぎの存在が示唆され（トカマクの場合と異なり）極めて狭い領域（ ~ 1 cm以下）にその揺動が集中していることが示された。大学と核融合研究所の共同研究によってもたらされた物理・工学双方に重要な知見である。

ヘリカル装置群からはMHD、輸送、加熱、周辺プラズマなど様々な局面の核融合理工学の基礎的研究が展開されている。まず、燃焼プラズマの時代に向けてトロイダルプラズマ全体で問題となる高エネルギー粒子とMHD不安定性の相互作用に関する観測が多くの装置（CHS, H1, HFS, ヘリオトロンJ）で行われている。磁気構造による特性の違いに興味を持たれるところである。CHSでは様々な計測器の同時観測が行われており今後の解析の進展が期待される。輸送過程の理解をめざした実験としてはCHSからはETBおよびITB双方について揺動と電場の観測について進展が見られている。また、ガスパスの制御による新しいHモード領域についても報告され周辺領域制御の重要性が示唆されている。ポストデッドライン論文では帯状流を繰り込んだ場合の輸送の改善についてCHSのデータに適用された例が報告された。バイアス実験はTUヘリアックおよびTJ-IIにおいて行われ、輸送の分岐をもたらし基礎過程として重要な、新古典論的粘性とレイノルズストレスによる乱流による平均流の生成という観点からそれぞれ研究が進められている。また、ヘリカル系のもつ配位の変性を活かして、ヘリオトロンJでは有効リップル率の低減に伴いLおよびHモードにおいて閉じ込めが改善すること、TJ-IIでは内部輸送障壁形成に果たす有界面の役割を示す実験観測が報告されていた。LHDからは、閉じ込めの改善を伴うゆっくりとした遷移の詳細について研究が進んでいる。トカマクでも見られるRIモードなどの分岐現象の理解につながることを期待される。加熱に関連して、LHDではECHをNBIプラズマに重畳することで（詳細なメカニズムは不明であるが）イオン温度の増加が観測されている。ヘリオトロンJではバンピネスを変化させることでブートストラップ電流成分を制御しECCD電流駆動と組み合わせることでネットの電流をゼロの状態にすることができたことその他、バンピー成分の増加によって高エネルギーイオンの閉じ込めの改善が報告された。周辺の問題としては、LHDからHモードやELMに果たすエルゴディック層の役割の重要性が示唆されるとともに、ヘリオトロンJではトロイダル電流の変化とダイバータープラズマとの関係など将来重要となる課題についても報告されている。

ヘリカル系は無電流の配位として共通点を持つが、それぞれの配位を比べると様々な個性をもっている。その中で共通の物理を国際協力の下で追求しようとする試みが進んでいる。一例として、内部輸送障壁のデータベースの開発について報告されている。新しい装置としてW7-XとNCSXの建設状況も報告されていた。NCSXのファーストプラズマは2009年と計画されている。また、今回初めて行

われた実験の（帯状流に関する）トピカルオーバービューではCHSの研究が中心的な役割を果たしており、ヘリカル系での研究がトロイダルプラズマ全体の理解に貢献していることが示された。ヘリカル系としては低循環エネルギーおよび定常性と密度特性に優れた独自路線をめざした研究とともに、今後、さらにトロイダルプラズマの総合的理解をめざした研究が展開されることが期待される。（藤澤）

(4)球状トカマク、RFP/CT実験

球状トカマク（ST）分野の論文はトカマク以外としては22件と多く、近年のSTの世界的広がりを反映している。内訳は、オーバービュー3件、MHD・運動論的安定性関係7件、輸送・乱流関係5件、電流駆動・立ち上げ関係5件、周辺プラズマ関連2件といった内容であった。

大型実験は米国NSTX（PPPL）、英国MAST（UKAEA FUSION）の2つで、NSTXは、7 MWのNBIを用いて規格化ベータ5.7、トロイダルベータ17%、電流0.7 MA、非誘導電流成分65%のSTを電流 redistribution timeの5倍（エネルギー閉じこめ時間の50倍）に相当する長時間：1.6秒維持している。これは(1)ダイバーターポロイダルコイルと形状制御技術の進歩により、高橋円度と高三角度が両立され、(2)54個の抵抗性壁モード（RWM）センサーと共に周方向に配置した $n = 1/n = 3$ モード用半径方向磁場補正コイルにより、OHコイル、TFコイルのエラー磁場を補正し、実時間でRWMを抑制したことが寄与している。過去最大の3を含む高橋円度（通常は2.4-2.5）、低内部インダクタンスを有する放電で、壁付き条件のベータ限界に近い規格化ベータ4.5-5.2に達する高ベータSTを1秒程度維持することに成功している。ITERで予想される低回転状態でのRWMの抑制が特徴である。ブートストラップ比も50%、トロイダルベータ20%に達し、STをベースにしたCTF（Component Test Facility）実現に必要な目標の多くを達成した。MHD・輸送研究では、同じくITERで予想される“Sea of TAE”モードに類似した多重のTAEモードが不安定化する現象がneutron rate低下に同期して現れることが明らかになった他、径方向にスキャン可能な1 mmのマイクロ波散乱計で乱流計測を電子ラーモア半径スケールに精細化して電子の異常輸送を検証した。形状制御と放射ダイバーターさらにリチウムフラッシュによるコンディショニングの採用により、ダイバーターのピーク熱負荷を1/5に減少させ、Coaxial Helicity Source (CHI)によるソレノイドコイルなし立ち上げでは、160 kAのプラズマ電流を達成した。

一方、MASTでは、1.2 MAに達する高電流化とともに重水素燃料ペレット入射がスタートし、運転パラメータ領域が大幅に広がった点が特徴である。ELMやH/L遷移を引き起こさずにHモードを維持することに成功している。MASTのLモードはL97スケールを上回り、橋円度の依存性があること、HモードはNSTXとともにIPB98y2に幅広く一致し、ベータ値と橋円度の相関が強く、DIII-D装置のスケールリング則の比較により、gyro-Bohmが優勢と考えられることが報告された。 $n = 1$ モードに対するエラー磁場補正コイルの設置により、Locked Modeの限界値に関するスケールリングを確立する一方で、NBIによるプラ

ズマ回転を用いて、鋸歯状波振動の間隔や precursor 周期を制御したこと、個々の ELM の質量放出がトムソン散乱計測で明快地計られたことも特筆できる。

大半径 0.8 m クラスの NSTX, MAST に対して 0.3–0.5 m クラスの中型 ST 実験として、ロシア Globus-M 装置 (Ioffe PT Inst.), 東京大学 UTST, TS-3 装置, 京都大学 LATE 装置から、ST の立ち上げ・電流駆動・加熱に特化した実験が紹介された。Globus-M 装置では不純物抑制によってループ電圧を低下させた他、OH および NBI 加熱運転について密度限界を検証し、ガスパフで 0.4 T における Greenwald 限界に達する $1.1 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ の密度を得ている。チタンに吸着させた水素をガンでジェット状に放出・入射して、コア部への密度供給が試みられた他、ホットイオンを有する低密度 NBI 運転と電子加熱が見られる高密度 NBI 運転を通じて粒子加熱機構が検証された。LATE 装置では、5 GHz, 130 kW, 70 ms の ECH による非誘導 ST スタートアップ実験で 15 kA のプラズマ電流立ち上げに成功した。自己誘導のために電流中心の電場は負極性であり、電子は最高 100 keV に達する高エネルギーのテイルを有しており、電子バーンシュタイン波と電磁波間のモード変換による電子サイクロトロン加熱で説明できることが報告された。超高ベータ・短パルス実験に特化した UTST 実験の建設・初期実験と共に、ST 合体による立ち上げ・加熱機構が TS-3 実験から示された。高トロイダル磁場下でも合体を駆動すれば電流シートが変形・放出する間欠効果によって磁気リコネクションが高速化し、MW のプラズマ加熱が発生したことが報告され、TST-2 の高周波電流駆動・加熱技術とともに UTST へ適用予定である。

逆磁場ピンチ (RFP)・コンパクトトラス・分野の論文は 19 件と多岐にわたり、ある意味で自由な物理研究が清涼剤となっていた。内訳は RFP 関係が 11 件と多く、FRC 関係が 6 件、スフェロマック関連が 2 件であった。RFP では、最大規模のイタリア RFX 装置 (EURATOM-ENEA) が Thin-Shell (3 mm) の条件で 192 個のサドルコイルでエラー磁場を補正すると共にフィードバック制御で MHD 不安定や RWM の抑制に成功し、一方、米国 MST (U. Wisconsin) では、550 kA, 1 keV の放電を達成し、重水素ペレット入射による閉じこめ改善を行っている。内部リコネクションで見られる自己組織化現象の解明など、物理指向の実験も展開している。

FRC 分野では、スフェロマック合体による FRC 生成装置として東京大学 TS-4 と米国 PPPL の MRX から報告があり、それぞれ OH コイルによる FRC の準定常維持とその際に必要な熱エネルギーが自然供給される物理、低 n モード、特に $n=1$ モードに対する安定性に関する実験・シミュレーションの比較が報告された。回転磁場 (RMF) で FRC を立ち上げ・維持する米国 TCS 装置 (U. Washington) では、非対称 RMF による温度上昇や不純物抑制実験、トロイダル磁場を有する球状 FRC の生成と安定性に関する理論との比較がなされた。テータピンチ生成・移送型装置である大阪大学 FIX では小型コイルで誘起した波動の伝搬とプラズマ加熱が報告された。スフェロマックでは、米国

LLNL の SSPX 実験がプラズマ電流と同軸ガン磁束の向上により、電子温度を 200 eV から 350 eV へ向上させ、米国 HIT-SI 実験 (U. Washington) は RFP を半分にしたような 2 個の半ドーナツ型ヘリシティー入射装置によりスフェロマックが維持されることを報告した。 (小野)

(5) 磁場閉じ込め理論

今回の IAEA における磁場閉じ込め核融合理論関連発表の特色として、L.Chen によるアルヴェン波とその高エネルギー粒子閉じ込めへの影響という「トピックス」に基づいたオーバービューが行われたこと、また、実験解釈との関連 (現状・今後) が特に深いと考えられる発表が、関連するトピックスの実験のセッションで行われたことが挙げられる。

競って開発がなされてきているジャイロ運動論 (GK) に基づくシミュレーションコード開発がさらに進展し、ITG/TEM スケールと ETG スケールとを同時に取り扱えるシミュレーションコードの開発 (J. Candy), 5 次元空間に拡張された GYSELA コードによるトロイダル ITG のシミュレーション (X. Garbet: 初期分布関数が非線形過程に与える影響の指摘) などが報告された。また、GS2 コードによる MAST プラズマにおける ETG 乱流シミュレーション (J.W. Connor) では、電子熱伝導係数が、mixing length による評価よりも十分大きいレベルになることが報告されていた。また、渡邊智彦氏の GK-Vlasov シミュレーションによる、GAM 振動、残留ゾーナルフローダイナミクスの研究は、ゾーナルフローに関する実験のオーバービュー (藤澤氏) と相まって、実験・理論・シミュレーション一体となった研究の大きな流れを予感させるものであった。

ELM 現象についても、非線形 MHD コードによるシミュレーションの進展が報告され、水口氏によるスフェリカルトカマクにおける崩壊時の中 n precursor に続く低 n 構造の出現に関するシミュレーションは理論のサマリーでも大きく取り上げられた。米国で開発されてきている非線形 MHD コード: NIMROD, M3D の DIII-D における ELM 解析への適用を通じたモデル検証、それに基づく ITER における ELM 特性の予測なども報告された。

加熱・電流駆動分野では、福山氏の TASK コードによる ICRH の自己無撞着な full wave 解析の進展が注目された。また、6 次元テスト粒子コードによる準線形 ICRH オペレータの検証や、EBW 実験の波動解析、加熱効率なども報告された。

統合モデリング・統合コード開発も競って行われている状況である。Fusion Simulator (Becoulet: 平衡+線形・非線形 MHD 安定性+放電立ち上げ+微視的不安定性・輸送+電流駆動), TGLF (Staebler: Trapped Gyro-Landau-Fluid, ITG, TEM, ETG) などの開発の進展が報告された。また、TOPICS (林氏) による JT-60U における ELM によるエネルギー損失の解析、3 次元統合輸送コード (中村祐司氏) によるヘリカルプラズマでの電流時間発展シミュレーションなど、日本における統合コード開発の進展も大きなインパクトがあった。

MHD 関連では、石崎氏のペレット溶発シミュレーシ

ンによるプラズモイドの低磁場領域へのドリフト運動の解明が、サマリーでも言及された。Alcator C-Modにおける高圧ガス注入によるディスラプション回避実験のNIMRODによる解析もなされていた。PIESコードによる解析で、W7-ASの高 β (~3%)平衡での磁気面の乱れが明示され、トカマクの平衡解析でもこのような効果を考える必要があるのではないか、とサマリーで言及されていた。

多階層解析も大きなトピックスであった。宮戸氏の巨視的ITGシミュレーションによるGAM振動と乱流輸送とのエネルギー移送を通じたカップリングの明示、critical gradient近傍での間歇的GAM振動とその間の無振動ゾナルフローの蓄積によって、無振動ゾナルフローがあるレベルに達すると乱流輸送が抑制される(岸本氏:ポストデッドライン口頭発表)ことが報告された。ITB形成における有理面の寄与が種々の実験で示唆されているが、低 q 有理面近傍でのvortex mode(低ポロイダルモード数)が実効的なゾナルフローとしての役割を果たすというDiamond氏の発表は、有理面の役割を説明する一つの考え方であると感じた。Hallatchek氏は、磁気シア、 q 、幾何形状がGAM振動に与える効果を系統的に示し、中でも、楕円度を大きくするとGAM周波数が低下し、またGAM振動へのエネルギー移送が大きくなることを示していた。

理論のサマリー(S.Krashennikov)では、理論研究の活発さが強調された反面、Fusion Energy Conferenceであるのに、核融合炉において重要なペダスタル、密度限界、第一壁表面(再堆積、フィルム形成、表面組成変化など)に関する理論研究の発表が少ない(ほとんどない)ことへの危惧も述べられた。(横山)

2. 慣性核融合

慣性核融合の発表は全発表中24件であった。その内訳はレーザー関係が18件、Zピンチが3件、イオンビーム関係が3件であった。前回(総数28件)と比べ減少したが、EUの発表数が減ったことが直接影響した。開催地の地理的な要因があったものと思われる。オーバービューおよび主要なテーマに関しては以下のとおりであった。

オーバービューの筆頭は、大阪大学レーザーエネルギー学研究所の三間による日本の高速点火核融合に関する以下の概要報告があった。高速点火の原理実証実験(FIREX: Fast Ignition Realization Experiment)のための加熱レーザー(LFEX: Laser for Fusion Experiment)の建設が着実に進んでおり、2006年6月には1ビームで3.6 kJのエネルギーを発生させることに成功した(宮永らが詳細発表)。2007年末には激光XII号レーザーによる爆縮と組み合わせた高速点火の統合実験が予定されている。このためのターゲット技術開発も進んでおり、特に、核融合科学研究所と共同で金コーン付クライオターゲットの製作技術開発を進め、技術的な目処がついてきた(岩本らが詳細発表)。関連したシミュレーションも行われており、爆縮、高速電子発生、加熱に関して個々の解析だけでなくこれらを統合した高速点火統合コード(FI3)の研究開発でも統合実験の解析、FIREX-Iの加熱予測などで成果がみられた(長友らが

詳細発表)。基礎実験では、GXIIを用いた平板クライオ実験によってプレヒート問題の解明が進み、その対策も提案された(疇地らが詳細発表)。

米国のオーバービューはロチェスター大学のSangsterが代表して行った。ローレンスリバモア国立研究所(LLNL)のNIF(National Ignition Facility)の建設は順調に進んでおり、2009年には完成予定である。その前年からは一部実験が開始され、クライオ装置の搬入を経て、2010年からは点火実験キャンペーンが行える見通しがあったことが報告された。この点火実験で必要となるターゲット製作技術に大きな進展が見られ、ロチェスター大学とGeneral Atomicsの共同実験では、NIFで要求されるクライオターゲットの内面仕上げ精度を満たすターゲットのショットに成功した。

Zhangから、中国の慣性核融合開発とそれに関連するレーザープラズマ物理研究の現状について以下のような報告があった。現在綿陽のレーザー核融合研究所に建設中のSG(Shen Guang: 神光)-IIIについては建屋が完成し、ターゲットチェンバー(直径2.6 m)が設置された。また、SG-III用のレーザーのプロットタイプ(4 pass, 8 beam, 2 ns, 3ω , 2.75 kJ/beam)が完成し、これを用いた物理実験が開始された。2010年には全64ビーム(200 kJ, 3 ns)が完成し、爆縮実験が開始される予定である。SG-IIIで行われる実験の設計は主に北京の応用物理と計算数学研究所で開発した計算コード群、LAREDシリーズを用いて行われている。これらのコードは、上海にあるSG-IIで行われた実験と比較しながら改善されてきている。特に、状態方程式、オバシテティ計測、X線レーザー計測手法などで進展があった。また、高速点火に関する研究にも着手し、特に北京の物理研究所ではレーザープラズマ相互作用の理論および実験を中心とした基礎研究に注力し着実な成果が見られている。

高速点火の基礎物理や応用研究に関する発表が増えてきたのも今回の特徴であった。たとえば、Mackinnonからは、米国ではプロトンによる高速点火の検討が進んでいるほか、米国のロチェスター大学で高速点火実験用のOmega EPレーザーの建設が進んでいるとの報告があった。田中らの発表では、フォーム層によって加速電子を制御し加熱効率を向上させることができる可能性が示された。兒玉らは高速点火だけでなく近年注目を浴びている高エネルギー密度科学(HEDP: High Energy Density Plasma)への活用が可能で、プラズマデバイスへも応用可能な高エネルギー電子輸送に関する実験結果を示した。さらに、前回、新しい概念として提案された衝撃点火核融合に関連した実験が開始され、ターゲットが 6×10^7 cm/sまで加速できたことが報告された(村上ら)。この他にVelardeらによる高速ジェットで加熱する方式、Horaらによるイオンで加熱する方式など高速点火方式研究は広がりを持つようになってきた。

乗松らは、出力1.2 GWの高速点火核融合炉Koyo-Fを提案するとともに今後開発すべき炉工学上の課題が示されていた。また、炉に必要なレーザー技術に関し、河仲ら

はセラミック Yb: YAG を用いて従来よりコンパクトで高効率なシステムを設計した。高速点火方式核融合炉に関しては初めての概念設計であり今後のリファレンスモデルになると思われる。

米国のイオンビームに関しては、短パルス化、高輝度化などを進め HEDP の基礎物理研究に活用しながら核融合への活用を模索している旨の報告が Yu よりあった。また、Z ピンチによる X 線源で駆動する爆縮の実験施設 BAIKAL の提案がロシアの Grabovski からあった。(長友)

3. 核融合炉工学

核融合炉工学に関する発表は67件、口頭発表 (rapporteured paper を含む) 14件およびポスター発表53件で、前回会合とほぼ同等の発表件数であった。これらのうち、既存・新規装置技術開発関連は18件で、EAST の装置技術開発関連が6件あり、中国の高い技術とプロジェクト遂行力が印象深かった。原型炉に向けた工学技術開発は、37件であったが、材料開発と IFMIF 開発が10件を占め、材料開発の重要性がよく現れていた。炉工学技術開発26件のうち、ブランケット・ダイバータ関連が21件を占め、これら炉内機器の開発の原型炉開発における重要性を物語っていた。また、そのうち、ITER に取り付けて試験をするテストブランケットが7件あり、ITER を試験ベッドに用いるブランケット試験が現実に向けて動きつつあることが感じられた。炉・システム設計が12件、慣性核融合に関するものが2件発表された。

新装置に関する発表では、今大会のハイライトである EAST のファーストプラズマ達成までの装置建設が報告され、発表途中にもかかわらず、満場の拍手がおくられてい

た。また、SST-1 (インド)、K-STAR (韓国) とアジアにおける新装置建設の進展が報告され、また日本からも JT 60SA の計画が報告されるなど、アジア諸国の核融合開発のパワーがめだった。

また、材料開発と IFMIF 開発では、低放射化鋼の開発とデータ整備が、国際的な協力を有効に活用して、照射・非照射を含め計画的に進められていることが報告されていた。また SiC/SiC, パナジウム合金など、先進的な炉概念向けの構造材の開発も大きく進展していることが報告された。また、ITER 計画に関連して幅広いアプローチ計画も具体化しつつあることを反映し、IFMIF 計画に関する報告も2件あった。これらの活発な材料開発に関する報告で、核融合開発における材料開発の重要性がよく認識できた。また、ブランケットを主対象とした中性子工学関連の発表が増えており、核融合の原子力工学としての認識の重要性が増していることが感じられた。これは、ブランケットの開発の活発化と呼応するものであった。

将来の原型炉設計の発表では、先進トカマク、ST、ヘリカルに関する設計研究の成果が発表され、高ベータ、コンパクトな炉形で、定常運転をめざす方向性が示された。

核融合炉工学関連のサマリーは、関昌弘氏 (前原子力研究開発機構 那珂核融合研究所長) により、最終日の口頭発表として、ITER 工学技術を含めて、講演された。今大会での重要な成果として、建設が近づいている ITER の工学技術の進展と原型炉に向けた炉内機器・材料開発の進展、新装置の建設の進展が概観された。多くの新装置建設が進み、とりわけ EAST のファーストプラズマ点火を達成した中国など、アジアのパワーを強く感じた。(榎枝)

(原稿受付日: 2006年12月18日)