



インフォメーション

■会議報告

第26回 IAEA 核融合エネルギー会議 (FEC2016)

森崎友宏 (核融合研), 井手俊介 (量研機構),

長崎百伸 (京都大), 江尻晶 (東京大),

政宗貞男 (京都工繊大), 矢木雅敏 (量研機構),

白神宏之 (大阪大), 中島基樹 (量研機構)

概 要

2016年10月17日から22日まで、京都市の国立京都国際会館において、国際原子力機関主催の核融合エネルギー会議が開催された。日本での開催は、1974年の東京、1986年京都、1998年横浜に続いて4回目となる。今回は、40の国と地域および2国際機関から、1,016人 (同伴者、スタッフを含む総参加人数1,417人) が参加した。ITERの建設が始まり、核融合エネルギーの実現に向けた研究開発の進展を反映して、これらの数字は過去最大となった。発表件数は、口頭発表117件 (基調講演2件、オーバービュー23件、磁場閉じ込め実験36件、プラズマ総合性能と制御2件、理論18件、慣性核融合6件、工学系23件、ポストデッドライン2件、サマリー5件)、ポスター発表722件 (口頭発表を含む) であった。口頭発表では国内から22人が登壇し、前回と同等の貢献であった。日本からの国際プログラム委員は、鎌田、井上、岸本、白神、森崎が努めた。

会議は、冒頭の日野之弥 IAEA 事務局長、水落敏栄文部科学副大臣、竹入康彦核融合科学研究所長の挨拶に続き、飯吉厚夫中部大学理事長 (核融合研初代所長) とフロレンティーノ・ポルテロ教授 (フランシスコ・デ・ヴィトリア大学、スペイン) による基調講演が行われた。飯吉先生のご講演は「持続可能な世界の発展のための核融合」と題して行われ、これまで目覚ましい進展があった ITER 研究を評価されるとともに、プロジェクトの結実と核融合発電の実現に向けて、今後も世界が協力して研究に取り組むことの重要性を説かれた。国際関係論や政治問題をご専門とされるポルテロ教授は「核融合エネルギーへの挑戦とその戦略的重要性」と題して、人類の新石器時代から現在に至る発展の歴史を様々な発明を引き合いに出しながら議論され、将来核融合が人類の歴史を新たな時代に転換することになるであろうというメッセージを発信された。

その後、6日間に渡って多くの議論がなされ、最終日の午後には、サマリーセッションで各分野のトピックスが総括された (磁場閉じ込め実験: 鎌田裕, D. Hill, 磁場閉じ込め理論: S. Konovalov, 慣性閉じ込め: S. Jacquemot, 核融合工学: J. Li)。以下、本会議における各分野の発表内容について報告する。尚、今回はインドがホスト国となり、2018年10月22日から、グジャラート州ガンディーナガルで開催される予定である。

(森崎友宏)

トカマク

ビゴー ITER 機構長から、2025年のファーストプラズマに向けた体制の強化と、ITER サイトの現状の報告が行われた。サイト工事の明らかな進捗が見て取れ、計画の進展を認識することができた。今回の会議では、このように ITER サイトでの建設が進む中、多くの研究報告がより ITER を見据えたものになってきたと実感された。特に大きな課題の一つである ELM に関連する報告が多く行われた。ELM 制御コイル (RMP コイル) を用いた、長時間の ELM 抑制が DIII-D や KSTAR, EAST といった装置で実証され、特に EAST では、20秒を超える ELM 抑制が報告された。より ITER に近い低衝突数領域での ELM 抑制も ASDEX-U や DIII-D で実証されるなど、ITER での ELM 制御に向け着実な進展が感じられた。ELM やその原因となるペデスタルの成長や安定性についても、様々なアプローチにより理解が進んでいる。JT-60U と JET の実験結果の解析から、プラズマの断面形状がペデスタルや ELM の性質に与える影響が示され、ELM 間や ELM 中でのペデスタル構造の変化が JET や ASDEX-U で解析され理論モデルとの相違等が報告された。ELM のない運転領域についても DIII-D の QH モードや Alcator C-Mod の I モードが、より ITER に近いパラメータで示されたのが注目され、外部制御に依らない ELM 回避手法についても今後の発展が期待される。

ITER のもう一つの課題であるディスラプションについても、大量ガス入射 (Massive Gas Injection: MGI) や粉碎ペレット入射 (Shattered Pellet Injection: SPI) 等によるディスラプションの緩和や逃走電子の抑制に関する報告が多く装置からあった。特に、ITER のディスラプション時での最大の懸念である逃走電子の発生や抑制に関する発表が多かった。各装置とも、ITER でのディスラプション/逃走電子緩和シナリオを考慮して実験を進めている。例えば DIII-D からは、同一の入射位置や入射ガス量の下でいずれも ITER で用いられる予定である MGI と SPI を比較した報



京都国際会議場における会場の様子。

告があり、SPIの方が速くプラズマ中心部に到達し、中心ピークの密度分布が得られることが示された。また、ダイバータ熱負荷もSPIの方が少なくなるとの報告があった。

ダイバータもITERでは課題の一つであるが、今回の場合では、Nuclear Fusion賞の受賞論文が2件とも周辺プラズマ・プラズマ壁相互作用についての研究であり、またJETのオーバービュー講演では冒頭で容器内重水素インベントリー、不純物再堆積、ダストなどプラズマ壁相互作用に関わる研究成果が報告されるなど、ITERや原型炉の時代を前に、この分野の重要性が再認識された会議であった。

また、本格的なDTやDD放電に移行する以前の非放射化フェーズ(HやHeを用いた放電)についても、加熱手法やHモード遷移パワー等についてJETやDIII-D等から報告され、ITER初期の運転についてもより具体的なアプローチが始まっていることが感じられた。

多くの実験はITERの標準運転、すなわちHモードの誘導電流駆動放電に、重点が置かれているが、ITERの定常運転や定常炉実現に向け、非誘導電流駆動プラズマの実験開発も進められている。ASDEX-Uからは、50%程度の自発電流と中性粒子ビームと電子サイクロトロン波による電流駆動を組み合わせた完全非誘導電流駆動プラズマの報告があった。DIII-Dでは、従来の弱負磁気シアではなく、中心安全係数が約1の正磁気シアプラズマでの完全非誘導電流駆動プラズマの報告があった。これは、30%程度の自発電流と中心付近での中性粒子ビームと電子サイクロトロン波による電流駆動を組み合わせたもので、MHD不安定性により自発的にこのような電流分布を形成するものである。原型炉での電流立ち上げ時の磁束削減に関するモデリング等も報告され、ITERの先を見据えた研究も行われている。

コアプラズマの閉じ込めやMHD安定性についても、低衝突数や電子加熱といったキーワードを軸に研究が進んでいる。

一方、ITERや原型炉に向けてプラズマの制御がより重要視されてきていることが明確となった。ITERにおける実時間制御開発に関する報告にはじまり、特にモデルや第一原理によるプラズマ予測を組み合わせたモデル制御で、実験への適用も含め多くの報告があった。例えば、これまではあまり実時間制御になじまなかったダイバータトムソン散乱計測による電子温度の測定を用い、実時間で不純物ガスバフ量を制御したダイバータデタッチメントの制御研究の報告もDIII-Dから行われていた。今後、この領域がプラズマ性能や運転領域の拡大に向けて、重要な役割を担っていくと思われる。

国内計画と日欧協力の両面から進められているJT-60SAプロジェクトからも進捗の報告があり、2019年のファーストプラズマをめざし、すでに真空容器が340度まで組み上げられ欧州が製作担当のトロイダルコイルも2基JT-60SAサイトに到着していること等、ITERに先行してトカマク本体の製作が順調に進んでいることが示された。

次世代の大型プロジェクトの進捗と、それに向けた流れ

が感じられる会議であった。

(井手俊介)

ヘリカル系

ヘリカル系実験での最大のトピックは、W7-Xのプラズマ実験開始であろう。建設開始から15年の年月を要したが、コミッショニングは順調に進み、2015年12月にファーストプラズマが生成された。その後、2016年3月までの10週間にわたって実験が行われ、最大4.3 MW、6秒(最大入力エネルギー4 MJ)のECRHパワーで $T_e < 8$ keV、 $T_i < 2$ keV、 $n_e \sim 3 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ が達成された。主要計測システムが実験開始当初から立ち上がったこともあり、磁気面構造、プラズマ生成、パワーバランス、コア電子ルート閉じ込め(CERC)、ブートストラップ電流、on-/off-axis加熱、X2- and O2-ECRH、ECCD、SOL物理などの多くの実験がなされている。今後、定常運転に向けてアイランドダイバータの設置を予定しており、ヘリカル系研究は新たな展開を迎えることになった。

LHDについては、本会議最初のオーバービュー講演として最近の実験成果が紹介された。37件にのぼる実験・理論に関する報告がLHD研究の充実を示しており、主な成果として、平均ベータ4.1%(磁場1 T)、ECRH入射条件の最適化やプラズマパラメータ領域の拡張($T_e, T_i > 6$ keV)、ICRFによる48分の定常運転、周辺平行フローの不純物スクリーニング効果、ヘリカル炉FFHR-d1のデザインとR&D等に関する報告がなされた。来年度から重水素実験が予定されており、高性能プラズマの達成、閉じ込め・PWIに対する同位体効果、高エネルギー粒子の閉じ込めが目標として設定されている。

TJ-IIからは、3次元磁場形状が閉じ込めへ及ぼす影響という観点から種々の実験報告がなされた。プラズマポテンシャルの非対称性によって生じる不純物輸送、新古典理論を用いた不純物ホールの解釈、メルシエ不安定磁場形状でのMHD安定性、プラズマフローに対する磁気島の効果、L-H遷移に対するMHDの役割、ECHや磁場配位(回転変換、磁気井戸)によるアルフベン固有モードの制御等が報告された。また、dual HIBP、ペレット入射、液体リチウム、LiSnリミターの適用などの新たな試みがなされている。

Heliotron Jからは、高強度ガスバフ(HIGP)によって生成された高密度プラズマでのL-H遷移、電子内部輸送障壁に対する有理面の役割、周辺乱流揺動・長距離相関への同位体効果、ICRFによって生成された高エネルギーイオンの閉じ込めに磁場配位が及ぼす影響、ECH/ECCDによる高エネルギー粒子励起MHD不安定性の制御が報告された。石澤は口頭発表でジャイロ運動論シミュレーションによるLHD、Heliotron J配位での乱流輸送解析結果について報告し、LHDにおける磁気軸内側シフトがゾーナル流緩和時間を長くすること、また、Heliotron Jでの高バンピー成分を用いた新古典最適化が乱流熱輸送の抑制に繋がっていることを示した。米国、ドイツにおいても同様の解析が進んでおり、今後の配位最適化研究において重要な指針となる可能性がある。

コストリカではヘリカル装置 SCR-1 が製作され、2016年6月にプラズマ実験が開始された。12個のモジュラーコイルを用いており、比較的小さなアスペクト比 ($R/a \sim 4$) を特徴としている。小型装置とはいえ、今後ラテンアメリカでのヘリカル系研究が進むことが期待される。

(長崎百伸)

球状トラス

日本には小型球状トラス装置が多数存在し、全日本ST研究グループを組織し、研究を進めてきた。今回は、高瀬雄一氏が日本の球状トカマク研究の overview を行い、八つの実験装置 (TST-2, TS-3, TS-4, UTST, TOKASTAR-2, LATE, HIST, QUEST) の成果、理論研究、将来計画についてまとめた。その他に NSTX-U, MAST, Pegasus の口頭発表があった。

NSTX-U は NSTX の改造後の名称である。トロイダル磁場の増強 ($0.5 \rightarrow 1$ T)、プラズマ電流の増加 ($1 \rightarrow 2$ MA) 放電時間の伸長 ($1 \rightarrow 2$ s)、二基目の NBI による加熱電流駆動の増強 ($5 \rightarrow 10$ MW) を目的とした二年間に渡る改造を終え、実験を開始したが、約千ショットを終えた所で、ダイバーターコイルの内部短絡により実験を中断した。修理を行い、一年後に実験を再開する予定である。短い実験期間ながらも、0.6 T での二秒放電と NSTX の記録を更新した。H モード遷移、閉じ込め、安定性等の点で、NSTX の高性能プラズマを再現し、順調に実験が始まったと言ってよい。

MAST は2013年より改造を行っており、2017年から MAST-U として実験を再開する予定である。改造は、二基目の NBI の増設、Super-X・閉ダイバーター・ダイバータ排気の実現、形状制御用コイルの増設、トロイダル磁場の増強 ($0.6 \rightarrow 0.9$ T)、プラズマ電流・放電時間の増加 ($\rightarrow 2$ MA) を狙ったものである。NSTX-U でも MAST-U でもロックドモードを回避するために誤差磁場低減の対策を行ったか行かう予定であるが、必ずしも予想 (理論) 通りではないこともわかっており、さらなる研究が必要である。

Globus-M は、現在、Globus-M2 へ改造中である。主な改造はトロイダル磁場の増強 ($0.5 \rightarrow 1$ T)、プラズマ電流の増加 ($0.2 \rightarrow 0.5$ MA)、二基目の NBI (50 keV/ 1 MW) である。トロイダル磁場コイル、センターソレノイドはすでに完成し、2017年に最初のプラズマを予定している。上記3装置とも高磁場高電流高加熱をめざしており、それによる大幅な閉じ込め性能の向上が期待でき、球状トカマク研究が転機を迎えたと言える。

球状トカマクでのハイライトは Pegasus での $\beta_T \sim 100\%$ の達成であろう。下部に設置した3つのヘリシティ入射装置 (プラズマガン的一种) で非誘導的にプラズマを生成し、平衡解析を行った所、 $I_p = 104$ kA, $I_N \sim 14$ で $\beta_T = \langle P \rangle / B_{T0}^2 \sim 100\%$ を達成した。平衡解析には磁気計測だけでなく中心の圧力測定値も用いているので、それほど精度は悪くないと思われる。

NSTX の過去のデータ解析に興味深いのは LH 遷移の研究である。LH 遷移のモデルに乱流エネルギーが直流のフ

ローのエネルギーに変換されて、乱流 (輸送) が抑制されるという捕食者・被捕食者モデルがある。NSTX でのガスパフイメージングの測定から速度場を求め、レイノルズストレス等を評価し、エネルギーのフローを求めたところ、このモデルとは逆にエネルギーが流れることが分かり、モデルと矛盾することが示された。ただし、解析に不確実性があることも述べられおり、今後の課題としている。

日本からの発表で目を引いたのは、QUEST における2時間弱の長時間放電であろう。高温壁を導入し、 8.2 GHz/ 40 kW で $I_p = 5$ kA を維持した (この時の壁温度は約 400 K)。LATE では OXB モード変換で 5 GHz のカットオフ密度の6倍の過剰密度を得て、EBW 電流駆動を実証した。また過剰密度を実現する条件が EBW の第一伝搬領域の利用であることを示し、今後の EBW 電流駆動の指針を示した。TST-2 では低域混成波を用いた電流駆動を行っており、弱磁場側アンテナでの最高駆動電流値の更新 ($16 \rightarrow 25$ kA) が報告された。この更新には波が伝搬可能な SOL プラズマの制御が重要であることが示された。また、高密度での電流駆動の改善が予測されているプラズマ上部にアンテナを設置し、その初期結果が報告された。これまでの所、弱磁場側アンテナとの大きな違いは見いだされていない。HIST は同軸ヘリシティ入射により球状トカマクを生成する装置であり、内部磁気ピックアップコイルにより、電流密度分布が拡散して閉じた磁気面が形成されていく様子を見事に捉えたのが印象的である。

2つのプラズマを生成、合体させると磁気再結合時にイオン加熱が起きる。TS-3, TS-4, MAST での実験から、イオン加熱は結合する磁場強度の二乗に比例することが示され、それに基づいて英国で ST40 装置が建設中である。これはトロイダル磁場 3 T, $I_p = 2$ MA で設計され、温度 10 keV、密度 $1 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ 以上を目標とした野心的な装置である。2016年末から2017年早期に最初のプラズマ放電を予定している。UTST からは、電子加熱機構について報告があった。トロイダル磁場印加条件で、再結合電流層内に閉じた磁気面が形成されるのを初めて実験的に明らかにし、それにより電子の閉じ込めが向上し高エネルギー電子が生成されると説明した。

(江尻 晶)

RFP/ICC

逆磁場ピンチ (RFP) 分野では、RFX-Mod (イタリア・パドバ Consorzio RFX) と MST (米国・ウイスコンシン大) から2件の Overview Poster 発表があり、これらと Extrap-T2R (スウェーデン・王立工科大学アルフベン研究所)、RELAX (京都工繊大)、および2015年にファーストプラズマが点火された新しい RFP 実験装置 KTX (Keda Torus eXperimentant: 中国・中国科学技術大学) から計10件のポスター発表が行われた。RFP に関連する理論も2件発表があった。ICC のカテゴリーではシアフロー安定化 Z ピンチ (ZaP: 米国・ワシントン大学)、磁化同軸ガンによるヘリシティ入射 (HIST: 兵庫県立大)、磁場反転配位 (FRC) (C-2U: 米国・Tri Alpha Energy 社、日本大学)、

AC ヘリシティー入射によるスフェロマックの定常運転 (HIT-SI, HIT-SI3: 米国・ワシントン大), ダイポール磁場トラップ (RT-1: 東京大学) など 6 件の発表があった。

RFX-Mod からは, 3 次元磁場効果 (ヘリカル境界の形成による 3D RFP 配位形成, 輸送, 乱流への効果), 輸送障壁の性質, MHD 制御, 同位体効果 (重水素プラズマにおける閉じ込め改善とヘリカル RFP 形成) が報告された。トカマク運転に関しては円形断面およびシングルヌルダイバータトカマク配位における H モードの長時間運転, 摂動磁場の逃走電子閉じ込めに対する効果, MHD モードのフィードバック安定化による $q_a < 2$ トカマクの安定保持, などが報告された。

MST からは, 閉じ込め改善モードで観測される補足電子モード (TEM) 乱流, 限界密度勾配に関する実験と GENE コードによる安定性解析結果が報告された。NBI 時に観測されるバーストモードの高速イオン輸送に対する影響, Island-Induced Alfvén Eigenmode の観測と高速イオンの非軸対称性に関する報告もあった。MST では QSH はロックドモード様に現れる QSH の位相を外部コイルで制御して, 固定された計測器でヘリカル RFP に関する詳細測定が可能となった。多数のテアリングモードとエラー磁場の相互作用に関するモデル化が進んだ。さらに MHD シミュレーションの validation に関連して, 統合データ解析 (IDA) による Z_{eff} と T_e の測定, ドリフト波と 2 流体物理を NIMROD に組み込んだ拡張 MHD モデル評価のための乱流起源ダイナモ項, 応力項など実験データ解析に関連する報告もあった。

Extrap T2R からは, MHD フィードバック制御系を駆使した外部摂動磁場のプラズマ回転に対する影響の実験結果とトルクバランスモデルによる解析との比較, 新古典トロイダル粘性の評価などが報告された。RELAX からは RWM の安定化による高電子ベータ値の達成, 深い反転領域での QSH の観測結果と非共鳴キンクモデルの成長によるヘリカル RFP 配位形成過程の比較が報告された。KTX は新しい RFP 装置であり, 装置の概要と初期 RFP プラズマの特性が報告された。

FRC では C-2U の最近の結果が報告された。直線磁場の両端から入射された 2 つの FRC を中心で衝突させる。10 MW の NBI と終端電極を利用したバイアス安定化の併用によりビーム駆動 FRC の長時間維持が可能となり, イオンの閉じ込め, 乱流抑制機構などが報告された。

ヘリシティー入射に関しては, HIT-SI および HIT-SI3 の AC ヘリシティー入射による定常電流維持と, HIST による磁化同軸プラズマ銃を用いた DC ヘリシティー入射の結果が報告された。HIT ではインジェクターを 2 台から 3 台に増やすと MHD 緩和に関与するモードのスペクトルが広がって定常電流値が大幅に増加することが報告された。HIST からはプラズマ銃から入射されたプラズモイドの磁気リコネクションを経由する緩和と電流輸送過程の実験結果が報告された。RT-1 では ICRF 加熱装置を導入し, 遅波によるイオン加熱の観測と, 密度の inward diffusion とベータatron 加速の協同で発現するイオン加速が報告された。

全体としては, MHD フィードバック制御, NBI などの能動的方法の導入と高精度計測機器の導入により, 個別プラズマ磁場配位の核融合装置としての性能改善の方向, RFP 装置におけるトカマク配位形成のように磁場配位の枠を超えた物理的基礎の理解をめざす方向, 実験との定量的比較を通してモデル・シミュレーションの予測性を高めようとする方向が感じられた。

(政宗貞男)

磁場閉じ込め理論モデリング

理論・モデリング関係では 191 件の発表があった。前回 (2014 年, サンクトペテルブルク) の時が, 148 件であったから, 43 件の純増である。内訳は【輸送・閉じ込め】(全体の約 40%) : 乱流, 熱・粒子輸送・運動量輸送, 【エッジベデスタル】(全体の約 20%) : ELM, 三次元効果, 【SOL・ダイバータ】: ターゲットにおける熱フラックス, 三次元性, コアとの結合, プラズマ壁相互作用, 【MHD 安定性・ディスラプション】: (特に) ディスラプション, 【高エネルギー粒子物理】: AE, EPM, 関連する高エネルギー輸送, 【統合モデリング】である。ITER に対する予測シミュレーション研究が顕在化しており, ELM 制御やディスラプション研究が増加傾向にある。

理論のオーバービューでは Breizman 博士 (IFS) が相対論的逃走電子の運動論に関する講演を行った。逃走電子のアバランチ生成が起きる電場の閾値近傍で厳密な運動論理論を適用することにより, Rosenbluth-Putvinski の予測に比べアバランチが起きる閾値電場の値がファクター 2 の範囲で強電場側にシフトし, それより低い電場ではシンクロトロン放射減衰の効果によって逃走電子電流の成長率が負となる領域が現れること, および逃走電子電流の減衰時間スケール (寿命) が運動量空間のアトラクタが臨界安定となる電場の値によって決まること等を示した。これらの発見はディスラプション緩和実験の定量的な解釈を可能にし, ITER におけるディスラプション研究の基盤となるものである。関連して, 逃走電子の物理研究やディスラプション研究が全体で 12 件あり, ディスラプションのセッションが実験 (4 件) と理論 (2 件) から構成されていた点は特記に値する。ちなみに国内からは逃走電子の研究で 2 件のポスター発表があった。

局所乱流シミュレーション研究では, トカマクにおけるマルチスケール乱流に関する発表が目立った (5 件+実験 1 件)。また, 不純物の乱流輸送の研究も着実に進展している。ベデスタルにおける乱流輸送研究も見受けられた。ヘリカル系においても進展が見られ, 温度勾配駆動ドリフト波乱流に対する磁気シャーや磁気井戸の効果が明らかにされた。ヘリカル系の乱流シミュレーション研究に関しては, 日本が先行しており, 日本から口頭発表 1 件, ポスター発表 1 件があった。グローバルジャイロ運動論モデルによる内部輸送障壁シミュレーション研究, 新古典輸送・磁気島・乱流の相互作用の研究, モデルの高度化等が進行していた。統合モデリング分野ではコアとエッジの連結モデルが標準化しつつある。この分野では日欧のアクティビ

ティーが非常に高い。今回、タイから3件のポスター発表があった点は印象に残った。また、伊藤公孝博士 (NIFS) がトロイダルプラズマで観測されているヒステリシスや速い時間スケールの現象に関する輸送理論研究をオーバービューポスターとして発表した。

エッジペデスタル研究ではペデスタルの安定性解析やELM制御やそのダイナミクスにハイライトがあてられていた。JET-ILWにおけるペデスタルの安定性解析やELMのマルチマシンにおけるモデリング研究が着実に進行している。米国ではBOUT++コードが、欧州ではJOREKコードが、ELM解析のための標準的なコードとして確立している。

高エネルギー粒子については、実験との比較による妥当性評価がかなり進展し、周波数挿引現象やバースト現象等が定量的に比較できるレベルにまで達している。この分野では日本のアクティビティーが高く、MEGAコードを用いたシミュレーション研究で1件の口頭発表、1件のポスター発表があった。DIII-Dにおいては高速イオンの輸送を説明する臨界勾配モデルが提案され実験による妥当性の評価が行われていた。

プラズマ材料相互作用の分野では、実験報告ではITERに向けたJET-ILWの研究が注目されたが、理論シミュレーションにおいては流体モデル、ジャイロ運動論モデルによるSOL輸送のシミュレーション研究やモデリングが多く見受けられた。Krashennikov博士 (UCSD) はエッジ・ダイバータプラズマにおいて、プラズマのディタッチメント、安定性、プラズマ壁相互作用に関する総合的研究をオーバービューポスターとして発表した。また、ジャイロ運動論シミュレーションによりダイバータ板における熱フラックス幅を評価し、ITERへの外挿結果が報告されていたが、ブロップ輸送をはじめとしてJET等での今後の実験的検証が必要であろう。

全体を通じ、実験のカテゴリーではあったがディスラプション予測のためのビッグデータの機械学習に関する報告があり、20年ぐらい前に検討されていたニューラルネットによるディスラプション予測からかなり進化している印象を受けた。また、米国からは核融合エネルギー研究を支える基盤研究の発表がポスター発表でいくつか見受けられた。研究に対する米国の考え方や財政事情を反映した結果であると推察される。なお、磁気閉じ込め理論のサマリーはKononov博士 (Kurchatov Institute) が行った。その発表資料を参考にさせていただいたのでこの場を借りて感謝する。

(矢木雅敏)

慣性核融合

慣性核融合関係 (IFE 分野) では、主として米日欧におけるプロジェクトおよびその関連の成果を軸とした報告と共に、計測、炉設計に関する報告がなされた。

米国からは、J. Edwards (Lawrence Livermore National Laboratory) が全米の慣性核融合関係の成果進展をOV講演でまとめて報告した。米国の計画では、間接照射爆縮

(NIF, LLNL), 直接照射爆縮 (OMEGA, Rochester Univ.), およびMagnetized Liner Inertial Fusion (MagLIF) (Z machine, Sandia Lab.) が平行して進められている。特筆すべきはNIF (National Ignition Facility, LLNL) において、核融合点火燃焼をめざした間接照射爆縮燃料コアプラズマの性能向上が見られ、 α 粒子による燃料の自己加熱が起り、爆縮DTプラズマに与えられた内部エネルギーの2倍に相当する核融合出力が得られたことの報告である。これは爆縮を駆動する輻射の時間波形のフット部分の強度を高めて (high-foot) 爆縮の流体不安定性を抑制した結果得られたものである。ただし、核融合出力は設計値よりはまだ低く、その原因として、交差するレーザービーム間でエネルギーが移動する現象 (cross-beam energy transfer: CBET), 流体不安定性、燃料カプセルの保持方法などに未解決の課題があることを意味している。また、high-footパルスではNIFの出力では点火燃焼には到達できないことが解っており、より高性能の爆縮を実現するための元のlow-footパルスでの実験が待たれる。これに関連して、爆縮における非一様性やミキシング, ion kineticsなども新しい成果が報告された。Rochester大学のOMEGAレーザーでは、直接照射型爆縮に関して、shock ignitionの研究が進み、中心スパークの圧力が50 Gbarに達したことが報告された。これはレーザー出力をOMEGAの26 kJからNIFの1.9 MJにすれば α 加熱が起こるレベルと流体力学的に等価であると報告された。OMEGAではNIFで問題になっているCBETの詳細も調べられている。MagLIFについても、Zピンチプラズマにおいて統合実験が開始され、磁場印加によりDD中性子イールドが1000倍になったことが報告された。

日本からは、大阪大学を中心として進められている高速点火核融合に関して、疇地 (大阪大学) からOV講演で、加熱用レーザーで発生させた高速電子のエネルギーを適度な状態にすること、燃料プラズマへの高速電子流を外周印加磁場の導入により集束させること、等により燃料温度を3 keVまで上昇させることに成功し、目標である5 keVに向けての実験が進行中であることが報告された。それに関連して、加熱レーザーの性能向上、高速イオン発生、磁場印加プラズマでの爆縮シミュレーションなどの進展がOral, Poster講演で報告された。同じく日本の浜松グループから、2方向対向照射においてWeibel不安定性により燃料加熱が起こったと報告され、また繰り返し照射実験の進展についても報告された。

フランスからは、LMJレーザーにおいて (建設中ではあるが) その一部を用いたターゲット照射実験が開始されたこと、および今後の計画が報告された。

中国からは、サマリーの報告がpost-deadline paperとして申し込まれたが発表はなされなかったもので、サマリーの中で一部紹介があった。180 kJ/48ビームのSG-IIIレーザーがまもなく稼働開始するとのことである。

これらのプロジェクトを中心とした報告に加えて、MFEで開発された高分解X線分光器などのプラズマ診断技術、実験炉の概念設計や炉材料の検討などに関する報告

がなされた。

IFE 分野からは、OV 講演 2 件（米 1，日 1），Oral 講演 6 件（米 2，日 3，欧 1）の口頭講演がなされた。Poster は 15 件（内、日 8）であった。日本のアクティビティが多く取り上げられたのは良いのだが、逆に言えばそれは、より大きな規模でプロジェクトを展開している米欧からの IAEA-FEC への寄与が少ないことを意味しており、IFE 全体の成果が伝わりにくくなっているのではないかという懸念がある。

今回の IFE 分野のサマリーは、S. Jacquemot (LULI, 仏) によりなされた。

（白神宏之）

核融合炉工学

核融合炉工学に関しては 218 件の発表があった。発表では各国の装置の開発状況や得られた実験結果の紹介や各国の DEMO 設計活動の進展、ITER 機器の調達状況や技術的な進展について報告がされた。オーバービュー講演では Wolf より Wendelstein 7-X の運転開始が報告され現在得られているデータの紹介や今後の定常運転に向けたスケジュールについて報告された。一方で Marmar によって運転終了した Alcator C-Mod の、その独特な設計や運転条件によってもたらされた革新的な知見について紹介され、ダイバータなどプラズマ対向機器開発への貢献について周知され、サマリーセッションでは Alcator C-Mod のこれまでの核融合炉開発への貢献に会場から拍手が上がった。ITER の建設状況については ITER 機構の Bigot 機構長から報告があり、スケジュールが更新され 1st Plasma が 2025 年、DT 運転が 2035 年を予定していることが発表された。各国

の調達機器の製造は順調に進んでおり、超伝導体やジャイロトロンなどについて技術的に進歩していることが報告され、ITER の完成に一步步着実に前進していることがアピールされた。特に日本が開発を進めているフルタングステンダイバータについては、IO の要求値をはるかに上回る高熱負荷にも耐えることが実証され、NBI についても 60 秒ものロングパルス運転が達成されており、今後の ITER や JT-60SA の開発に大きく前進したことが確認された。ITER-TBM の開発状況については CDR を終えた中国が PDR に向け、バックプレートの構造や冷却材であるヘリウムの流れなど設計の最適化を進めており、中国独自で開発している低放射化鋼のデータについても照射環境のデータを含めて取得しつつあり、着実な進展が見て取れた。

材料開発に関する発表では日本やアメリカの低放射化鋼や ODS 鋼、W 合金、SiC/SiC 複合材料などの研究が進められているものの、両者ともに核融合炉相当の中性子源の開発が重要と考えているように思われた。ポスター発表では W 合金中の析出物を制御することによる結晶粒径の制御やそれによる機械的性質の向上などといった合金設計に関するトピックや、ODS 鋼については多くの国が開発を進めており、日本では異材継手の機械的特性の評価や ODS 鋼を用いた場合の運転条件の検討などが注目されていた。

本会議では、プラズマ物理から核融合炉工学といったように幅広い分野の研究者が成果発表を行うため、普段接する機会が少ない分野の研究者と情報交換を行うことが可能であった。核融合炉はそれぞれの分野のみでは成し得ないことから、今後ともこの会議を通じて核融合炉工学分野やプラズマ物理分野などとの密な連携が期待される。

（中島基樹）