

インフォメーション

■会議報告

27th IAEA Fusion Energy Conference (FEC2018) 会議報告

藤岡慎介（阪大）、井手俊介（量研）、井上静雄（量研）、
佐藤雅彦（核融合研）、高瀬雄一（東大）、
田中謙治（核融合研）、林 伸彦（量研）、
江角直道（筑波大）、居田克巳（核融合研）、
浅井朋彦（日大）、杉本昌義（量研）

1. はじめに

国際原子力機関（IAEA）主催の Fusion Energy Conference 2018 (FEC2018)が、2018年10月22日～27日にインド北西部グジャラート州の州都ガンディーナガルの Mahatma Mandir Convention and Exhibition Center で開催された。今回は、インド政府がホストとなり Institute of Plasma Research の協力により会議が運営された。ガンディーナガルという町名は、マハトマ・ガンディーの町という意味である。プレナリー及び口頭発表で用いられたメイン会場は美しく飾り付けられており、1000名近い参加者を得て、盛大に開催された（写真）。会議報告を通じて、会員各位にFEC分野の進展の一端を伝えられれば幸いである。（藤岡慎介）

2. オーバービュー

開催国インドの、国際熱核融合実験炉ITER調達の進捗に関する報告から始まった。インドは、クライオスタット、Ion Cyclotron Range of Frequencies Heating (ICRF) ソース、高圧電源等の調達を担当しており、進捗は順調であるとの報告がなされた。クライオスタットはすでにITER

機構に輸送されており、その大きさは印象的であった。続いてITER機構のビゴー機構長から、計画全体の進捗が報告された。サイト建設や個々の機器の調達は進展しており、2018年の8月現在でファーストプラズマに向けた建設目標の57.4%が達成された。ものづくり以外にも、ITER Research PlanがITER Technical Reportとして初めて公開され、シナリオ検討などの進捗も報告された。ITER計画の着実な進捗が感じられた。

2.1 トカマク装置

JET（欧）は、DT実験準備状況を中心に報告した。これまでの高性能放電実験からの予測では10–15 MW、第一原理に基づいた予測計算では10–16 MWの核融合出力が期待されている。DIII-D（米）は、逃走電子散逸機構等の物理研究結果や、Super H-mode、幅広いペデスタルをもったQH-mode、高ベータ定常放電等の放電開発の進展を報告した。ASDEX-Upgrade（独）からは、ドップラー反射計による密度の渦構造の観測と磁気面に対するその傾きの変化が揺動のIon Temperature Gradient (ITG) から Trapped Electron Mode (TEM) への変化と対応しているという興味深い報告があった。超伝導装置のEAST（中）やKSTAR（韓）からは、その特徴を生かした長パルス放電開発；RFのみによるH-modeの放電時間の101.2秒への伸長（EAST）、H-modeの70秒維持や非誘導先進放電の20秒維持（KSTAR）、等が報告された。Alcator C-Mod（米）は2016年に23年間にわたる運転を終了し、その最後の運転でコア圧力2.1気圧、ペデスタル圧力0.8気圧といういずれも世界最高値を達成した。また、高磁場の広い領域でのI-mode実証やSuper H-modeの実証等の報告を行った。小型装置からの報告が多くあったなかで、HL-2A（中）でLHCD中に観測されたELMサイズの低下の物理機構として E_r シアの低下と乱流波数



初日朝のメイン会場の風景。

シフトの観測から密度揺動の増加の可能性が示唆されていたことが興味深かった。ディスラプション回避についてのオーバービューも行われ、電流や圧力分布の最適化や誤差磁場の最小化、機械学習等を用いたディスラプション予測、外部回転磁場や Electron Cyclotron Current Drive (ECCD) によるディスラプション回避、等々について現状がまとめられた。また、Edge Localized Mode (ELM) とその制御に関するモデリング研究の現状についてのオーバービューも行われ、共鳴磁場摂動 (RMP) やペレットによる制御、QH-mode 等に関する JOREK コードを用いた結果と実験との比較が示された。計算結果は概ね実験結果を再現しており、モデリング研究の進展が実感された。

2.2 低アスペクト比トカマク (ST) 装置

ST に関する領域オーバービューでは、ST で今後必要な研究を以下のようにまとめた：低衝突率領域での MHD 安定性、高自発電流率、規格化ジャイロ半径スケリング、高ポロイダルベータでの Scrape Off Layer (SOL) 減衰長スケリング、革新的ダイバータの開発、高中性子負荷に耐えられるブランケットおよび第一壁の開発である。NSTX-U (米) は 2016 年に 10 週間実験を行いデータ解析、理論・シミュレーションで多くの進展があった。実験再開は 2021 年の早い時期に予定されている。MAST-U (英) はスーパー X を含む多彩なダイバータ配位による熱・粒子除去の研究に重点が置かれる。実験開始は 2019 年秋に予定されている。

2.3 ヘリカル装置

LHD (日) からは、大型のヘリカル装置として初めて行われた重水素実験初期結果のまとめが報告された。重水素放電によりイオン温度 10 keV を達成する等運転領域が拡大し、詳細な輸送解析からも重水素プラズマで熱輸送が改善されていることが示され、明確な同位体効果が確認された。W7-X (独) からは、実験開始後 2 回目の実験期間の総括が報告された。Neutral Beam Injection (NBI) 放電による高密度放電 ($2 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$)、核融合三重積 $0.6 \times 10^{20} \text{ keV m}^{-3} \text{ s}$ 、Electron Cyclotron Heating (ECH) 2 MW による 100 秒放電、ECH 2.8 MW による完全非接触ダイバータの 2 秒間定常維持等を達成した。TJ-II (西) からは、実験で観測された帯状流の静電ポテンシャル緩和現象がジャイロ運動論 (GK) シミュレーションで再現できたこと等が紹介された。

2.4 慣性閉じ込め

FIREX (日) では、600T の磁場を印加、爆縮し LFEX レーザーで加熱した結果、高速電子のガイディング効果により、加熱効率が以前の 3% から 8% まで高められた。また、この実験では、シェルではなく中実球の固体ターゲットを 10 倍に圧縮することに成功している。National Ignition Facility (NIF) (米) では、一様性の改善、ホーラム内のビーム相互干渉問題などの対策状況が報告された。実験の始まった 2012 年に比べ、レーザーからプラズマエネルギーへ変換率は 3 倍、中性子発生量は 21 倍に増えている。爆縮したプラズマのエネルギーに対して 2 倍以上の核融合エネルギーが発生し、アルファ粒子加熱も

起こり燃焼が始まっている。OMEGA (米) では、レーザーの直接照射実験により 50 ギガバールのコアを達成した。直接照射で点火するためには 100–200 ギガバールが必要であり、現在、NIF レーザーを使って直接照射の実験を開始している。

2.5 その他の配位

その他の配位装置からの報告も行われた。RFP 装置 KTX (中) からは、計測器のアップグレードを中心とした報告がなされ、FRC 装置 C-2W (米) では $\sim 9 \text{ ms}$ の維持の成功が報告された。直線装置の Large Plasma Device (LAPD) (米) からは、avalanche transport やドリフト波と ICRF との相互作用等の研究に関する進展が報告された。

2.6 工学

材料科学分野 (MPT) で初の分野オーバービューとして、“The strategy of fusion DEMO in-vessel structural material development” が選ばれた。DEMO 設計開始時では、照射後の材料データが不足しており、許容性能限界を確信をもって結論づけることができない。経験的なアプローチから適当な安全係数を定義できないとして、確率的的手法に基づいた新たな設計戦略を提案した。JT-60SA (日欧) は ITER 及び DEMO の科学技術課題解決への貢献をめざす。18 個の TF コイルを正位置に据え付け真空容器の一周溶接が完了した。その他、日欧で分担して製作した、コイル、容器内機器、冷媒・冷媒供給システム等々の組み立ての進捗状況が報告された。CFETR (中) は、ITER と 1GW 出力実証プラント (PRPP) の間に位置付ける装置で、Phase I: $Q = 1-5$, $> 200 \text{ MW}$ 定常、Phase II: $Q > 10$, 1 GW 定常 ($> 50 \text{ dpa}$) を目指す。LIPAc (Linear IFMIF Prototype Accelerator) (日欧) は、入射系のコミッショニングを完了。100 keV / 140 mA の D+ ビーム加速に成功。Radio Frequency Quadrupole (RFQ) のコミッショニングを 50 keV H⁺ で開始し、これまでに $2.5 \pm 0.2 \text{ MeV}$ までの加速に成功。この時 RFQ の輸送効率は 96% を達成した。(2.1 ~ 2.6 井手俊介)

3. Magnetic Confinement/Stability カテゴリー

3.1 Experiment

前回の京都での会議同様、ELM に関連する研究成果が多く報告された。これは ELM によって生じるダイバータ板への熱負荷対策が ITER における最重要課題であることに起因すると考えられる。今回会議からの特徴としては、ペDESTAL 性能・安定性から、ダイバータ板への熱負荷までを統合した発表が目立ち、議論が各論から総論的になっていると感じた。H-mode の ELM 緩和制御に関しては JET などの大型トカマクだけでなく、KSTAR や EAST などアジアの中型トカマク装置による貢献もあった。一方で会議の中心には I-mode・QH-mode や Super H-mode など、ELM-free もしくは高性能ペDESTAL 運転に関する発表が据えられていた。それぞれの運転で ITER での実現可能性が議論された。AUG で L-I 遷移条件のパラメータ依存性、DIII-D で QH-mode のゼロトルク下での運転や ECH による Internal Transport Barrier (ITB) 形成と性能向上、Super-H モード運転により Alcator C-Mod で

ペデスタル圧力, DIII-Dで核融合出力の最高記録を達成したことが報告された. それぞれの運転モードでは先に述べたようにダイバータ熱負荷や放電の安定性等も意識して実験が進められている印象を受けた. 放電の安定性に関して, JET ITER-like wall プラズマの解析でディスラプションに至る放電の95%程でロックモードが前兆として見られる事が報告された. また, LHDで観測されているロックモード様不安定性ではモードの周波数とプラズマの回転周波数とが異なる事が明確に示され, 加えてロックモードの安定性はモードの周波数に対して強く相関する事が示された. この結果は粘性応力から決まる外部磁場の遮蔽/浸透だけでは物理的に説明できず, 理論・シミュレーションも含めた理解の進展が現象解明に必要なと考えられる. (井上静雄)

3.2 Theory and Modelling

安定性に関する口頭発表のセッションは, ELMに関するセッション (“Active ELM Control”) と逃走電子に関するセッション (“Runaways & Disruption Mitigation”) の2つがあり, 逃走電子に関するセッションでは, 5件中4件が理論に関する発表で, ディスラプション全過程のシミュレーション, 高Z不純物入射の影響, 逃走電子の軌道計算より得られるスペクトル分布と実験結果の比較, 壁に作用する電磁力の評価に関する発表が行われた. 一方, “Active ELM Control”では5件中, 理論の口頭発表はペレット入射の影響についての1件のみであった. TH/S領域に関連するポスター発表は約30件ほどであったが, 口頭発表のセッションで設けられているのと同様に, ELMおよび逃走電子に関する発表が非常に多く, 特にELMに関してはポスター発表全体のうち約1/3を占め, バルニンングモードからのテアリングパリティ生成に対するRMPの影響, 負の三角形度の効果, 圧力の非等方性の影響, (安定性のカテゴリーから外れるが) ジャイロ運動論コードを用いたRMP印加時の輸送の解析も並んで発表が行われるなど, 内容は多岐にわたっていた. ELMおよび逃走電子以外のトカマク装置に関する発表では, 新古典テアリングモード, マイクロテアリングモード, 抵抗性壁モード, ロックモード等, 様々な発表が見られていたが, 一方, トカマク以外の装置に対しては, ステラレータ・ヘリカル装置が2件, 球状トカマク装置が1件, 直線型装置が1件と, 非常に少なかった. (佐藤雅彦)

4. Magnetic Confinement/Wave-plasma interactions: current drive: heating: energetic particle カテゴリー

4.1 Experiment

JETでは3種イオンICRF加熱シナリオが開発され, D-(³He)-Hシナリオで高効率加熱が得られたほか, D-(D_{NB})-HシナリオではD_{NB}(NB入射Dイオン)がICRF加熱により100 keVから2 MeVに加速され, 中性子生成率が10倍以上増加した. EASTでは中心部ECHとLHCDにより, H_{98y2}=1.1の高閉じ込めHモードを100秒以上維持した. KSTARでも60秒以上のHモードを維持した

ほか, ポロイダルベータが2.8の非誘導放電を8秒間維持した. HL-2AではLHCDによるELM制御が行われた. Alcator C-ModではLower Hybrid Wave (LHW) 電場ベクトル計測により, SOLにおける密度揺動による散乱が示唆され, 高プラズマ電流(1.4 MA)でこれを抑制することにより高密度におけるLHCD効率改善が示された. 日本のTST-2, LATE, QUESTからはLHW, Electron Cyclotron Wave (ECW), Electron Bernstein Wave (EBW)によるプラズマ立ち上げ法開発の進展について報告があった. W-7Xではペレット入射との組み合わせにより, 高密度でのElectron Cyclotron (EC)加熱が得られた. KSTARおよびDIII-Dにおけるヘリコン波およびLHWによる電流駆動実験計画が紹介された.

Energetic Particle (EP) (イオンあるいは電子)のベータが熱的粒子のベータと同程度になるとEP駆動MHD不安定性が起こる. AUGでは非中心部NB加熱に伴う中心部タングステン集中により, 熱的粒子に比べEPのエネルギーが100倍でベータが同等という特殊な状態が実現され, 多数の大振幅EP駆動モードが観測された. DIII-Dでは, EP駆動のCompressional Alfvén Eigenmode (CAE)およびIon Cyclotron Emission (ICE)が観測され, 逃走電子駆動のウィスラー波も観測された. 種々のEP駆動MHD不安定性がECHまたはECCDにより抑制または緩和されることが多くのトカマクおよびヘリカル装置で観測されている. TCVではECHによる実時間ロックモード制御によるディスラプション回避が実証された.

(高瀬雄一)

4.2 Theory and Modelling

TFTR級トカマクのMEGA(流体-粒子ハイブリッド)シミュレーションによりアルフベン固有モード(AE)バーストの物理機構が明らかにされた. AEバースト前に, 複数の小振幅AEが成長し, 位相空間における高エネルギー粒子(EP)分布の局所的平坦化が起き, 階段状の分布が形成される. 更なるNB入射により局所的に平坦化された領域が拡大し, 重なりが起こる. AEの重なりはAEバーストを引き起こし, EPの大局的な輸送が起こる. 5 MWでも10 MWでも分布は変わらない. EASTでもEP駆動不安定性(フィッシュボーン, Beta-induced Alfvén Eigenmode (BAE), Toroidal Alfvén Eigenmode (TAE))による高速イオン輸送の計算が行われた. 統合モデリングにより, JETにおけるタングステン中心部蓄積の実験結果が再現され, これを用いてICRF中心加熱によるタングステン中心部蓄積緩和シナリオの最適化計算が行われた. 中性子, Fast Ion D-Alpha (FIDA), Neutral Particle Analyzer (NPA)計測による還元物理EP輸送モデルの検証が行われた. EP輸送のkickモデル, およびRBQ-1Dモデルを用いることにより, これらの計測結果に対するTAEおよびNeoclassical Tearing Mode (NTM)の影響を再現できることが示された.

(高瀬雄一)

5. Magnetic Confinement/Confinement カテゴリー

5.1 Experiment

閉じ込め及び輸送の実験結果については同位体効果、I-modeの運転領域、RMPの輸送への影響、およびジャイロ運動論シミュレーションと実験結果の比較について多くの報告がなされた。特に同位体効果についてはJETにおいて2020年にDT実験を行うための精力的な実験と解析が行われている。1990年代後半に行われたDT実験で過渡的に達成された15 MWの核融合出力を定常的に維持することを2020年のDT実験の目標にしているが、ハイブリッドシナリオやベースラインシナリオでも達成可能としている。また第一原理に基づくモデリングでE×Bシアの効果の違い、コアをジャイロボーム、エッジをEUROpedモデルを用いることにより目的を達成できるとしている。JETのHH,DD実験ではエネルギー閉じ込め、粒子閉じ込めともにH-modeにおいてイオン質量Aに対して $A^{0.5}$ に比例するという報告がなされた。一方、LHDにおいても同位体効果について精力的な実験と解析が行われているが、巨視的なエネルギー閉じ込めについてはイオンITBを形成しないNBI放電では A^0 、ECH放電では $A^{0.24}$ とJETの結果に比べて質量の依存性が小さい。また、粒子輸送はNBI放電で $A^{-0.26}$ 、ECH放電で $A^{-0.33}$ とJETの結果とは反対に負の質量依存性を示している。トカマクH-modeにおいては同位体効果によるイオン質量に対する正の依存性は主に、ペDESTALが高くなることによると考えられる。今後はコア領域とペDESTALで分けて同位体効果を検討する必要がある。AUGではペDESTALのないECH L-mode放電ではエネルギー閉じ込め時間はイオン質量に対して正の依存性を持つがこれは乱流の抑制などによる閉じ込め改善によるものではなく、イオンの加熱源である equipartition heating がイオン質量に反比例し、H放電でイオン加熱がD放電の2倍程度になるため、イオン閉じ込めの power degradation が大きいことによる閉じ込め劣化だという説明がなされていた。今後の実験の進展によりトカマクのL-modeおよびコア領域の同位体効果とペDESTALが小さいヘリカル系の同位体効果には共通の物理を見出すことができる可能性がある。

I-modeはL-modeとH-modeの中間に位置するものであり、エネルギー輸送はH-modeと同様であることにに対して粒子輸送はL-modeと同様でELMがなく将来のトカマク型核融合炉の運転シナリオとして有望である。Alcator C-ModではI-modeの運転領域は高磁場ほど広がることが示され、彼らの高磁場路線を正当化していた。AUGではドップラー反射計を用いた測定により、I-modeにおいてバースト的な揺動が現れ、熱負荷の上昇がみられるがこれはPeeling Ballooning安定性解析では安定領域であり、ELMではないとの主張であった。I-modeにおけるバーストにおけるダイバータの温度上昇はELMのときの温度上昇よりはるかに小さく、これらのバーストがあってもI-modeは熱負荷の低減に有効であるとの主張であった。

乱流計測についていくつかの興味深い報告があった。AUGではドップラー反射計を用いてECH放電とNBI放電で乱流渦の傾きが直接計測され、それがE×Bシアによるという結果が報告された。また、電子密度の乱流と電子温度の乱流の相関の計測が行われた。両者の相関は粒子束や熱流束を直接評価するものではないが、ジャイロ運動論シミュレーションとの比較において強い拘束条件となり、GENEをもちいたシミュレーションの結果と一致することが示され、シミュレーションの検証を進めることができた。KSTARのイメージング Electron Cyclotron Emission (ECE) では、ELM時の間欠的な温度成分の掃き出しや、アバランシェ的な温度分布の変化を直接計測した結果が報告された。

RMPはELMの抑制をするのにITERでも運用されることが予定されているが、輸送への影響を理解すること課題となっている。DIII-DではL-H遷移についてRMPの影響について詳細な報告があった。RMPを印加すると、H-mode遷移に必要な加熱パワーが上昇すること、これは、RMP印加によりE×Bシアが減少し、その結果乱流揺動が増加するためだとの結果が報告された。

W7-XではECH加熱ペレットでの高密度放電で良好な閉じ込めと、それに伴う乱流揺動の減少が報告されており注目を集めた。LHDのNBI加熱高イオン温度放電とともにsummary talkで最初に言及されていた。今後は両装置における同様な運転領域での輸送の詳細な比較を通じてヘリカル系閉じ込め磁場配位の異常輸送低減に関する知見を蓄積することが強く期待される。

(田中謙治)

5.2 Theory and Modelling

乱流輸送や新古典輸送の大域的ジャイロ運動論コードを用いた解析が多く報告された。閉じ込め分野の口頭発表は4件であったが、うち3件が大域的ジャイロ運動論コードを用いた発表であり、KSTARにおける共鳴磁場摂動の印加による磁気島のO/Xポイントでの揺動振幅の相違を、O/XポイントでのE×Bシアの乱流抑制効果の違いを考慮したXGC1のシミュレーションで説明できること等が発表された。また、ポスター発表では、XGC1と流体コードBOUT++が既存装置のダイバータへの熱流幅を再現し、大規模装置のITERでは乱流が輸送を支配する条件となり、熱流幅が増大することが示された。同条件下での実験による検証が今後求められる。一方、局所ジャイロ運動論コードを用いた研究からは、LHDやAUGにおける揺動計測のGKVおよびGENEによる良好な再現や、LHDで観測される不純物の自発的な外部吐き出しが起こる不純物ホール形成機構のGKVと局所ドリフト運動論コードDKES/PENTAを用いた乱流・新古典輸送の総合的な解析による理解、JT-60U実験のGKVによる解析に基づく粒子輸送モデルの構築等が発表された。炉心プラズマの性能予測等に用いる統合コードの開発も進展している。プラズマ中心部の乱流・新古典輸送、周辺部の構造、平衡、外部からの粒子源を無矛盾に扱うOMFITフレームワークをDIII-DとEASTの実験に適用した結果が報告された。その他、ITERにおける実験の

プラズマの時間発展予測に向けた統合モデリング活動が示された。統合コードに結合する輸送モデルとして、ジャイロ流体モデルTGLFなどの従来使用されてきたモデルに加えて、TGLFや局所ジャイロ運動論コードの結果を機械学習により高速に再現するモデルが用いられ、炉心プラズマの閉じ込め性能を評価・予測する研究が多くあった。(林 伸彦)

6. Magnetic Confinement Experiment, Theory & Modelling/Plasma-material interactions; divertors; limiters; scrape-off layer カテゴリー

このカテゴリーでの発表件数は、実験で56件、理論・モデリングで38件であったが、関連する発表は他のカテゴリー（EXC, EXW, FIP, MPT等）にも多く見受けられ、SOL・ダイバータの制御にはカテゴリーの枠を越えた議論の重要性を示しているといえるであろう。

“Divertor & Exhaust Physics”のセッションでは、6件の口頭講演があった。最初に、W7-Xにおける初めてのアイランドダイバータ実験の状況が報告され、28秒の安定な非接触ダイバータの達成とボロナイゼーションの有効性が報告された。続く講演もW7-Xダイバータ実験の報告であったが、こちらは、不純物（Ne, N₂）入射の效果に注目した内容で、不純物入射とアイランド配位の操作が熱流制御に有効であることが報告された。3件目はDIII-Dでは上流のプラズマ密度上昇に伴い、接触から非接触ダイバータへの遷移現象が観測され、UEDGEコードによる計算では、この遷移はE×Bドリフトに起因することが報告された。次に、理論シミュレーション関連で、ニューラルネットワークを利用したSOLフィラメント構造の観測データの新たな解析手法とSOL分布予測に関する報告があり、続いてUEDGEコードを用いたロングレグダイバータのシミュレーションに関する報告があった。最後にPlasma Wall Interaction (PWI)に関して、JETダイバータにおけるELM中も含むタングステン挙動に関する詳細な報告がなされた。会議全体では、原型炉で想定される高い熱負荷と定常運転への対応の重要性から、SOL幅に関する議論、RMPによるデタッチメント制御、多様なダイバータ配位に関する講演が多くあったのと、ジャイロ運動論コードを用いた周辺プラズマシミュレーションの進展が印象的であった。

(江角直道)

7. Inertial Fusion Experiments and Theory カテゴリー

上述のオーバービュー以外では、ロスアラモス研究所から、液体DT層のシェルを用いたNational Ignition Facilityにおける成果が報告された。液体DT層にすることで、シェル内部のガス圧を増し、半径収縮率（Convergence Ratio: CR）を変えることが可能である。CRが大きいほど、非一様性に起因する流体力学的不安定性の成長が大きくなり、最大圧縮時に形成されるホットス

パークの性能（温度、密度、中性子発生数）が劣化する。固体DT層の場合、CRは30程度でほぼ固定であるが、液体DT層を用い、CRを12～20の範囲で変化させた。CR=12の爆縮では、計測された中性子発生数が2次元シミュレーションの予測とほぼ一致する一方で、CR=19ではシミュレーション予測の20%しか中性子が発生していない。これは未だ理解出来ていない不安定性源が存在することを示している。CRを下げる（=点火部の質量を増やすことと等価）と点火に必要なエネルギーは増える。CRコントロールの物理実験としての価値は認めるが、点火実証に適した方法であるかは疑問である。ポスター発表では、ロシアでの研究が興味深かった。プラスチックシェル内に液体状燃料を充填し、それを冷却されたチューブ内で転がしながら冷却することで均一な固体燃料層を形成する方法を開発し大量生産可能なシステムを提案している。大量生産されたターゲットをサポーと呼ばれる容器に入れ炉心に投入する概念は、既に報告されていた。今回はその射出装置として高温超伝導体を使用したサポーとコイルガンシステムを提案した。高温超伝導体を安定に浮上させ、コイルガンで加速する実験を行い、現状は1m/sの低速での実証段階であった。低温を維持しながら加速可能であるが高温超伝導体の耐久性が課題となると思われる。

IFEカテゴリーは絶対数がそもそも少ない上に、日本以外からの参加は更に少なかった。日本からはLBO結晶を用いた二波長混合短パルス高強度レーザーの発生と高速点火方式への応用に関する研究、フォーム層及び赤外線加熱を用いたクライオ重水素燃料の製造法の研究、核融合炉ドライバーとしてのダイオード励起固体レーザーの開発とその産業応用の可能性、核融合炉実現に向けたターゲットの連続射出技術の開発、高速点火方式による核融合点火用のターゲットデザイン、高強度レーザーによる電子加速の物理モデル等、幅広い研究成果が発表された。IFEに直接関わる参加者は決して多くはなかったが、非常に密な議論が行われた。(藤岡慎介)

8. Plasma Overall Performance Control (PPC) カテゴリー

このカテゴリーはその位置付けが曖昧なためか発表されたのは、量子科学技術研究開発機構(QST)とITERからそれぞれ1件で、口頭発表・ポスター発表を含めわずかに2件であった。PPCに選ばれる論文数が極端に少なくなった現時点では、このトピックスを今後継続していく必要があるのか再検証の必要が感じられる。

QSTのN. HayashiはJT-60SA実験に向けて、圧力分布、プラズマ回転分布、電流分布、MHD不安定性に関する統合モデリングを行った結果について発表した。発表では、1)摂動磁場を使って新古典トロイダル粘性を変化させてトロイダル回転を制御するシナリオ、2)電子サイクロトロン波による電流駆動で新古典テアリングモードを安定化するシナリオ、3)負イオン源中性粒子ビームのoff-axis入射を行い、安全係数分布を制御して負磁気シア内部輸送障壁プラズマを定常的に保持するシナリオ

が示された。ITERのT. C. Luceは、ITERの核融合出力500 MW・核融合ゲイン $Q=10$ ベースラインに到達する運転シナリオについて発表した。従来の運転シナリオは、安全係数 $q_{95}=3$ を保持して磁場強度とプラズマ電流を同時にITERベースラインの値(5.3 T, 15 MA)まで上げて行くものであった。提案されたシナリオは、プラズマ電流7.5 MAの時点で先に磁場を5.3 Tまで上昇させた後で、電流を15 MAに向けて段階的に増加させるというものである。このシナリオ通りに行くと、ベースラインに達する前に目標の核融合出力・核融合ゲインが得られると予想している。(居田克巳)

9. Innovative Confinement Concepts カテゴリー

本会議ではICCの独立したセッションはなく、関連分野の主な発表はEXセッションに含まれる形で行われた。磁場反転配位(FRC)では、米国・TAEテクノロジー社からOverview Poster発表が行われた他、FRC中の乱流輸送に関するシミュレーションの報告があった。日本からは、日本大学より近年開始されたFRC衝突合体に関する実験結果が、またコンパクトトーラス(CT)に関連して、同軸ガンによるヘリシティ入射(兵庫県立大学)の発表があった。CT分野は歴史的にも両国が牽引しており、今回報告された2つのFRC実験の成果も相互に研究者が参加して得られたものであった。特にTAE社からは、最近開始された大型FRC装置C-2Wの実験結果が速報された。先行実験で得られた、異常拡散特性が消失し電子温度の2.3乗に比例し伸長するエネルギー閉じ込め時間のスケリングを検証するため、13 MWのNBI(現在21 MWまで改良中)や近接ダイバータが設けられ、およそ1.0 - 1.5 keVのプラズマ温度を達成している。この他、ミラー配位について、筑波大学およびロシア・Budker Instituteより2件ずつ、計4件の報告が、また、米国・ウィスコンシン大からミラー状配位による中性子源開発に関する発表があった。東京大学からはダイポール磁場トラップ(RT-1)の進展に関する報告があり、またイタリア・Consorzio RFXおよび中国科学技術大学から2件ずつ、計4件の逆磁場ピンチ(RFP)に関する発表があった。本会議におけるICC分野の発表は極めて限定的であったが、新概念による核融合炉心を開発するという機運が米国などで高まっており、同時期に開催されたアメリカ物理学会プラズマ分科会ではTAE社だけで30件の発表があった。核融合開発の裾野を広げ、また新たな可能性を検証するためにも、当分野からのIAEA-FECへの寄与が拡大することを期待する。

(浅井朋彦)

10. Materials Physics and Technologies カテゴリー

材料の物理・工学分野の発表は前回に比べ件数が減少しており、口頭発表及びそのポスター発表の計10件(5種類)であった。当該分野に関連するオーバービュー発表があるが、そちらは別途報告して頂くとして、内容は

(1) タングステン中の水素保持に対するプラズマ不純物の影響、(2) バナジウム合金の高温クリープ特性、(3) EASTやDIII-Dでの高Z材料損耗・物質移動のモデル実証、(4) ダイバータのプラズマ対向材としてのタングステン材のイオン照射・計算シミュレーション評価、(5) EUにおける材料照射中性子源計画の進展、と多岐にわたっていた。しかし、ブランケット構造材料開発について直接扱ったのがV合金1件のみで、ODS鋼を含む低放射化フェライト鋼に関するものはすべてFIP(核融合工学・統合・発電プラント設計)に仕分けされていた。SiC/SiC材や増殖・増倍材に関する発表はなかった。前向きに見れば、開発フェーズから工学利用に移ってきた証と捉えることもできる。一方、プラズマ対向材としてのWに関する報告が2件(水素同位体のリテンションに対するプラズマ不純物や照射損傷の影響、高Z物質(W, Mo)の損耗と輸送)あり、ITERに向けた動きの中でプラズマ対向材への関心が高まっていることが反映されている。ただし、同様のテーマでFIPやEXに仕分けされたものも多くあり、分類にあまり頼らず、発表を聞く必要があった。やや異質のものとして、欧州の材料照射用中性子源計画(IFMIF-DONES)の発表がありサイト選定まで進んだことが報告された。一方、日本における同様の計画であるA-FNSはFIPに仕分けされており、ここでも、分類の方針に違和感を感じた。全体的には、開催国インドの研究所の活発な研究開発の状況を直接知ることができ、潜在的なポテンシャルの高さを感じられたことが収穫であった。(杉本昌義)

11. 最後に

州都であるガンディーナガルには公的施設が集められているが、周囲にホテルや飲食店はほとんど無く、参加者の多くはバスで1時間ほどかかるアフマダーバードに滞在した。運営側指定のホテルから会場の間は、往復バスが用意されていたが朝と晩しか運行されなかったため、もっと便利で安価なUberを利用した参加者も多かったようである。現地の三輪バイクタクシーを利用した強者もいたが、阿吽の呼吸で成立するカオスな道路交通に生身をさらす勇気は残念ながら私には無かった。レセプションやバンケットではアルコール類が一切提供されず、よっぽどのいいない落ち着いたパーティーというのも貴重な体験であった。ノンアルコールであっても、バンケット会場で多くの人がインドの民謡に興じるなどの盛り上がりがあった。会議以外のインドネタも尽きないが、それはお近くの参加者から聞いて頂くとして、このあたりで会議報告を終えたい。(藤岡慎介)

(原稿受付：2018年11月20日)