



■会議報告

第28回国際原子力機関核融合エネルギー会議 (IAEA FEC)

高瀬雄一 (東大), 小林政弘 (核融合研),
今寺賢志 (京大), 野澤貴史 (量研機構),
池田亮介 (量研機構), 染谷洋二 (量研機構),
朝倉伸幸 (量研機構), 浅井朋彦 (日大)

標記会議が2021年5月10~15日の日程で開催された。本会議は「原子力エネルギーの平和利用に関する国際会議」の第1回(1955年, スイス・ジュネーブ)から続いており, 核融合を議題にした会合では最も規模の大きい会議である。当初は2020年10月に開催予定であったが, 新型コロナウイルスの世界的な大流行のため開催が延期され, また初めてのバーチャルイベントとしてインターネット上で開催された。そのためか, 125カ国・地域から登録者数4, 265人と非常に多くの参加者があり, 134件の口頭発表, 544件のポスター発表がなされた。プレナリーや口頭発表は事前に録画したものが発表時間に配信され, 各セッションの最後にそのセッションの司会者と発表者全員が画面に登場し質問に対して答えるという形式であった。今回からカテゴリーの見直しがなされ, OV (Overview), EX (Magnetic Fusion Experiments), TH (Magnetic Fusion Theory and Modelling), TECH (Fusion Energy Technology), IFE (Inertial Fusion Energy), IAC (Innovative and Alternative Fusion Concepts) に集約された。以下に各分野の概要を報告する。

1. オーバービュー (OV)

“開催国”フランスで建設が進行中の国際熱核融合実験炉ITERの組み立ておよびコミッショニングに向けた進捗に関するBigot ITER機構長からの報告で始まった。クライオスタット, PF6 コイルの設置, 最初のセクターサブアセンブリーの組み上げが開始されており, 建設は概ね予定通りに進んでいることが報告された。2025年末のファーストプラズマおよびその後の研究計画 (ITER Research Plan) の遂行をめざし, 困難を乗り越えていく旨の力強い決意が示された。

幅広いアプローチのサテライトトカマク計画および日本のトカマク国内重点化計画として日欧共同で進めてきたJT-60SAの建設のおよび研究計画 (JT-60SA Research Plan) 策定について報告された。ファーストプラズマに必要な設備の建設が2019年度末に終了し, 統合コミッショニングは順調に進んでいたが, EF1 コイル接続部の事故により中断していることが報告された。JT-60SAからの成果には大きな期待が寄せられていることが会議中随所で感じられた。

今回の会議では, 民間資金を使って急速に成果をあげている例が多数みられた。オーバービューでも Tokamak Energy (英: ST), Commonwealth Fusion Systems (米: トカマク), TAE Technologies (米: FRC) からの報告があった。

(1) トカマク実験

JET (欧) では三重水素 (T) 実験および D-T 実験の準備が完了している。シナリオ開発により, ITER-like wall (ILW) を使った運転領域が拡大され, 高温ペDESTALによるタングステン (W) スクリーニング, 小振幅 ELM シナリオ, Ne のシードガスとしての優位性等, 多くの物理解明につながっている。様々なアイソトープミックスの実験で ITER における予測の改善に寄与している。破碎ペレット入射 (SPI) によるディスラプション緩和に関する情報が得られたほか, ITER や DEMO のためのプラズマ対向機器 (PFC) や核技術検証の場を提供している。現在 T-NBI を使った T 実験が進行中であり, 2021年7月から D-T 実験が始まる予定である。

DIII-D (米) では上側入射による off-axis ECCD 効率の改善, 入射角度可変の off-axis NBI による圧力分布幅の拡大 (アルフベン固有モード制御) による長パルス高性能プラズマ運転の最適化をめざした研究が進んでいる。非接触ダイバータと共存する ITB のある高 β_p シナリオ, 放射ダイバータと共存するペDESTALが最適化されたスーパー H モードをはじめ多くの興味深い結果が報告された。HHFW (ヘリコン波), 高磁場側入射 LHW による電流駆動, W スロットダイバータ等が予定されている。

WEST (仏) では初期実験 (2017年より Phase I) が始まり, ボロニゼーションにより30-60秒の長パルス運転が可能となった。9 MW までの ICRF および LHCD パワー入射で W のプラズマ内蓄積は観測されていない。ITER 級のプラズマ対向ユニット (PFU) は健全に運用されているが, 0.3-0.8 mm の設置誤差のあるところで局所的溶融やクラックが見られる。2021年夏からの Phase II 実験では全 W 装置で1000秒の H モード定常運転をめざす。

ASDEX-UG (独) は W 壁トカマクである。コア部および周辺プラズマの輸送モデルに進展があり, コア部乱流輸送に対する高速粒子の重要性が指摘された。ELM が無い, または弱いシナリオの開発が行われており, 特に準連続排気 (QCE) 領域は高パワー, 高閉じ込め, 高密度, 非接触プラズマの共存が可能なので期待される。低振幅 ELM 領域へのアクセスにはセパトトリックス付近のプラズマパラメータが重要な役割を果たす。2023年からはシングルヌルからスノーフレイクまで変化可能な上側ダイバータを使った実験が始まる予定である。

TCV (瑞) は縦長真空容器に可変バッフル板をもつトカマクであり, 様々な配位の比較が可能である。バッフル板

の追加により中性ガス圧縮率が上がり、非接触ダイバータも実現しやすくなるほか、高いペダスタル温度が得られる。負三角度プラズマでは揺動レベルが減少し、電子・イオンとも高い温度が得られるほか、高ベータも得られる。今後パッフル版を順次改造することにより、多彩なダイバータ配位の比較実験を行う。2021年中には2台目のNBIを追加し、トルク制御、高速イオン関連実験を行う予定である。

EAST (中) は ECH+LH 加熱・電流駆動のみで、ITER-like W ダイバータを用い、コアと周辺部の両立可能な長時間 (60秒) 高 f_{BS} (50%) 高 β_p (2) H モード ($H_{98y2} > 1.3$) を実証した。新たに W 下側ダイバータを設置し、加熱・電流駆動パワーを増強することにより、ITER の運転条件で $f_{BS} > 50\%$ で400秒以上の H モード運転および100秒以上の 10 MW のパワー除去の実証が見込まれる。定常運転に必要な放射ダイバータの能動制御、ELM 抑制、He プラズマ等において大きな進展があった。

HL-2A (中) では、DTB を伴う高 β_p 運転が実証されており、輸送および閉じ込めに対する不純物の寄与に関する研究、L-H 遷移と ELM 緩和、高速粒子と MHD 安定性の研究が行われている。2020年からは HT-2L の運転が始まっており、次世代核融合装置のための高性能プラズマ、多様なダイバータ配位、高熱負荷・高粒子束下におけるプラズマ対向機器 (PFC) の試験と検証、ELM・ディスラプション・VDE 緩和等に関する進展が期待される。

KSTAR (韓) では、早期ダイバータ配位形成、中心部に強いピークをもつ高 T_i モード、定常高ベータプラズマ、長時間 H モード等、多様な高性能プラズマが達成された。RMP による ELM 抑制が達成された。雪崩的な電子輸送や QCM を含む基礎的な輸送過程に関する知見が得られ、対称性のある多重 SPI の検証が可能である。

ADITYA-U (印) はトロイダル磁場 (B_t) 1.5 T のトカマクであり、真空容器壁コンディショニングの最適化およびリチウムコーティング、ディスラプション緩和のための誘導型ペレット入射装置の開発、2パルスECHによる低ループ電圧立ち上げ、電極を用いたバイアスによるDTM回転速度の制御、Ne シーディングによるトロイダル回転および R-I モードへの影響等が報告された。

このほかポスターでは COMPASS (チェコ)、J-TEXT (中)、FTU (伊)、および燃焼プラズマをめざす高温超伝導コイルを用いた強磁場 (12 T) トカマク SPARC (米) の報告があった。

(2) 球状トカマク (ST) 実験

日本では多くの大学で ST 装置を用いた研究が行われており、これらグループ間の連携は核融合科学研究所 (NIFS) に支援されている。ECW/EBW によるプラズマ電流 (I_p) 立ち上げは LATE (京大) と QUEST (九大) で開発されている。QUEST では準接線入射で $I_p > 70$ kA の立ち上げに成功し、準垂直入射では $T_e > 500$ eV の電子加熱が得られている。LHW を使った I_p 立ち上げは TST-2 (東大) で開発されており、高速電子の振舞いを理解するためのモデリング開発が進んでいる。LATE では EBW 立ち上げプ

ラズマに電子ビームを入射することで、 n_e をカットオフ密度の30倍に増加させることに成功している。HIST (兵庫県立大) ではリコネクションによりプラズモイドが次々に生成されながら閉磁気面を形成していく過程を明らかにした。TST-2では、ECW と OH コイルを併用した I_p 立ち上げで、正曲率の弱い垂直磁場をかけた TPC を用いると、 I_p 立ち上げのガス圧領域が広がり、 I_p 増加も速くなることが示された。これは JT-60SA や ITER の立ち上げに有用である。TOKASTAR-2 (名大) ではプラズマの上下に設置された局所ヘリカルコイルによる VDE 安定化に成功した。QUEST では壁温制御により6時間の長時間運転に成功した。放電時間の上限はモデルで導出した壁飽和時間と同程度である。プラズマ合体を用いた急速 I_p 立ち上げは TS 装置群 (東大) で開発されてきたが、イオン加熱がリコネクション磁場の自乗に比例するという比例則が ST40 (英) との共同研究で、 $T_i = 2.3$ keV まで拡張された。

Globus-M2 (露) は $B_t = 1$ T の ST である。0.8 T までの実験で、閉じ込め時間が B_t にほぼ比例し、衝突度 (ν^*) にほぼ逆比例することが報告された。ST40 (英) は $B_t = 3$ T の ST である。2 T までの実験で 1 T を超えるとイオン温度も蓄積エネルギーも急激に増加することが報告された。TE 社では高温超伝導の開発も順調に進んでいる。MAST-U および NSTX-U は数年間実験をしていないので OV はなかったが、過去の実験の解析結果が報告された。MAST-U は運転を開始し、スーパー X ダイバータにより単位面積当たりのダイバータ熱流束が1桁以上減少するという結果を既に得ている。

(3) ヘリカル実験

LHD (NIFS) からは D 実験で高温領域へのアクセスが大きく拡大したこと、高パワー領域で D の方が強い ITB が得られることが報告された。D-H 混合プラズマにおいて、ITG が支配的な場合はイオン混合状態となり H と D の密度分布が同じになるが、TEM が支配的な場合は非混合状態となり異なる密度分布となる。RMP 誘起 H モードという新たな閉じ込め改善モードが発見された。

W7-X (独) では新古典輸送の最適化が予測どおりであること、乱流抑制が定性的に示されたことが報告された。ペレット入射と ECH のみにより、ヘリカル系で最高の $nT\tau$ が得られた。排気効率の高い安定な完全非接触ダイバータが得られたこと、ダイバータ不純物スクリーニングとリテンションについて良い結果が得られていること、コア部での不純物蓄積は乱流が抑制されたプラズマでのみ起こることが報告された。現在、高パワー定常運転への準備が進んでおり、2022年秋には水冷ダイバータを使った実験が始まる予定である。

TJ-II (西) では新古典および乱流輸送の検証、ペレットアブレーション、ECH・ECCD によるアルフベン固有モード制御、高速イオンによる帯状流形成、径電場と周辺部プラズマ乱流との関係、毛細管多孔性システム (CPS) を使った液体金属のプラズマへの暴露等の研究が行われている。

(4) 慣性核融合

アメリカが推進している慣性核融合の3つの方法である

レーザー間接駆動, レーザー直接駆動, 磁化ライナー慣性核融合 (MagLIF) が紹介された. NIF では過去 1 年間に核融合出力の大きな進展があった. 現状では爆縮が理想より劣化する原因として非対称性, ホットスポットミックス, 不完全圧縮があげられるが, 点火境界へのギャップを埋めるために, 爆縮の質を向上させる (圧力の増加), および爆縮のスケールを増加する (エネルギーの増加) という 2 つの道筋が示された.

(5) 理論

プラズマコア部のジャイロ運動論コード (GENE, GEM) と周辺部のジャイロ運動論コード (XGC) を結合させ, エクサスケールプラットホームで FOM > 50 の性能をもつ装置全体モデル (WDMApp) の構築に成功した. 理論に基づいた統合モデルの開発により, トカマク性能を前もって予測する ("predict first") ことが可能となり, 実験計画の策定やパルス設計のシミュレーションに使われている.

ヘリカル系理論の進展は, 高速イオンの閉じ込め, 乱流輸送の低減, コイルの複雑さの低減, 新たな最適化・設計法, 新たな 3 次元 MHD コードの開発等多岐にわたる. 物理理解の進展により, ヘリカル系の最適化が改善され, 優れた閉じ込め特性をもつヘリカル配位の設計が可能となった. (高瀬)

2. 磁場閉じ込め実験 (EX)

ヨーロッパの大型トカマク JET からは, H モードへの遷移過程を工夫した場合にタングステン不純物の遮蔽が起きることが実験的に初めて観測されたこと, Ne 不純物を導入した場合にダイバータデタッチメントと高いコアの閉じ込め性能が実現されたことなどが報告された. 中国の中型トカマク EAST からは, Ne や CD 4 の不純物を導入することで ELM が抑制されること, また ELM が抑制・緩和される場合には pedestal coherent mode (PCM) が重要な役割を果たしていることが示された. 同様な ELM 抑制についてはドイツの中型トカマク ASDEX-Upgrade においても Ar 不純物入射時に起こることが報告された. これら不純物と閉じ込め性能, ELM との関係は ITER の運転シナリオにとって重要な知見として注目されている. ASDEX-Upgrade からは, 原型炉に向けた運転シナリオとして, 比較的高い密度で運転することにより ELM サイズを小さくしてダイバータ熱負荷を軽減し, かつ高い閉じ込め性能を維持する放電例が報告された. フランスの中型トカマク WEST からは ITER のタングステンダイバータを模したダイバータ実験の報告がなされた. プラズマの密度分布が尖塔化している状況でもタングステン不純物が中心部に蓄積しない放電例が示された. また, タングステンダイバータの様々な損傷の様子が報告された. ドイツのヘリカル装置 W7-X からは, ITG (イオン温度勾配) 不安定性のためにイオン温度が抑制されていること, またベレットによる燃料供給により, この現象が回避できることが報告された. この他, 26 秒以上の安定したデタッチメント放電の結果が示された. 日本のヘリカル装置 LHD からは, 高温プラズマの達成, 閉じ込め性能への水素同位体効果, 軽水素と重水素

の混合・分離現象, 新しい閉じ込め遷移現象などの実験結果が示された. 日欧共同装置 JT-60SA からは最新の実験準備状況が報告された. (小林)

3. 磁場閉じ込め理論・モデリング (TH)

TH セッションでは, 計 227 件 (OV: 2, Oral: 28, Poster: 197) の発表があった. 前回 (ガンディーナガル, 2018 年) が 167 件, 前々回 (京都, 2016 年) が 203 件であることから, 件数は増加傾向にある. 大別した内訳は, 【閉じ込め・輸送】, 【周辺ペDESTAL・SOL・ダイバータ】, 【MHD・ディスラプション・高エネルギー粒子・加熱】がそれぞれ 3 割程度であったが, そのような枠組みを横断した研究発表が多かったことが本会議の特徴の 1 つであった.

その傾向を象徴的に表していたのが, 2 件のオーバービュー講演であった. Bhattacharjee (PPPL) の講演では, 装置全体を包含したモデリングの構築をめざして, コアプラズマを対象としたジャイロ運動論コード GENE や GEM と, 周辺プラズマを対象としたジャイロ運動論コード XGC を連結させたシミュレーション結果について報告があった. 一方, Staebler (GA) の講演では, ニューラルネットワーク (NN) 等を活用することで輸送・加熱・周辺ペDESTAL・安定性を統合的, かつ高速に評価可能なモデリングについて報告があった. いずれも, これまでの要素研究を包括的に取り扱うことで, より現実に即したプラズマの再現とその制御を目的としており, 10 以上の研究機関がそれぞれの役割を担うことで, 各プロジェクトを組織的に進めている印象を持った.

【閉じ込め・輸送】では Belli (GA) から, 周辺部における電子の非断熱応答によってジャイロボーム則で予見される同位体スケールリングが反転し, 実験で観測されるスケールリングと一致することが報告された. また Di Siena (UT) から, イオンサイクロトロン加熱によって駆動された高速粒子によってイオン温度勾配駆動型乱流が抑制され, 内部輸送障壁が形成されることが報告された. その他にも同位体効果や輸送障壁に関する講演はあったが, それぞれ全体で 5 - 10 件程度であった. 一方, 輸送モデリングやそれを用いたシミュレーションに関する講演は比較的多く (全体で 20 件以上), 特に機械学習を活用したモデリング開発に関する講演が目立った. 例えば Citrin (DIFFE) からは, 準線形ジャイロ運動モデルに準拠した輸送コード QuaLiKiz で得られたデータを NN で学習することで代理輸送モデルを開発し, それを統合コード JINTRAC に実装することによって得られた結果が JET の実験を高精度で再現することが報告された. QuLiKiz を用いた計算と比較して 10^5 程度の高速化を達成した点についても講演では強調されており, 前述の Staebler も言及していた "Predict First" を重要視していた.

【周辺ペDESTAL・SOL・ダイバータ】では, ダイバータへの熱負荷やペDESTAL の安定性, ELM のダイナミックス, 共鳴磁場摂動 (RMP) を用いたそれらの制御など, ITER や将来装置における重要課題が取り上げられていた. 特に今回は, これらの解析に対する標準的なコードと

して確立されつつある BOUT++ や JOEUK に加え、前述の Bhattacharjee も言及していたように、複数の新たなジャイロ運動論コードが導入されていた。例えば Hakim (PPPL) の講演では、新たに開発した電磁ジャイロ運動論コード Gkeyll で解析を行った結果、ダイバータ板に対する熱流束が電磁効果で10%程度減少することが報告された。また ELM や RMP の効果までは着手していない模様であったが、近い将来にはそのような効果を第一原理的に考慮した包括的なシミュレーションが可能になるものと思われる。

【MHD・ディスラプション・高エネルギー粒子・加熱】では、ITER の最重要課題の1つであるディスラプションの講演が多く（全体で20件以上）、逃走電子のダイナミクスやその計測方法、逃走電子や垂直位置不安定性によるディスラプションの予測、およびその低減等が取り上げられていた。Tang (PPPL) の講演では、再帰 NN を用いて、DIII-D 実験におけるディスラプションの予測を 0 次元および 1 次元入力データを用いて行った結果、ディスラプションを実時間スケールで高精度に予測したことに加え、それがどの物理的要因によるものかを同定したとの報告があった。このように背後に潜む物理を数理統計的に解析することは、予測の高速化・高精度化に加え、物理そのものの理解に貢献するものと考えられる。また、高エネルギー粒子についても講演数が多く（全体で20件以上）、TAE 等の高エネルギー粒子駆動モードに加え、乱流や MHD モードとの相互作用、他のコードや実験との V&V が取り上げられていた。佐藤 (NIFS) からは、熱イオンの運動論的效果を取り入れたシミュレーションを行った結果、その運動論的效果が MHD 不安定性を低下させ、LHD 実験に対応した高磁気レイノルズ数領域で高圧力プラズマが維持される結果が報告された。

全体としては、近年の IAEA 会議と同様に、ITER や将来装置で重要な課題に関する講演が変わらず大半を占めていたが、より包括的な物理モデリングの開発やそれを用いたシミュレーションが多かった。ハードウェアの進展や機械学習的なソフトウェアの革新がそのような研究を後押ししていることを勘案すると、今後もそのような傾向は継続していくであろう。したがって今後は、岸本（京大）が TH セッションのサマリー講演でも言及していたように、大規模な統合シミュレーションと数理統計的な解析、そして理論モデリングの3者の中で、データやモデルを相互に輸出入することで、より複合的な研究が展開されるものと予想される。（今寺）

4. 核融合炉工学 (TECH)

(1) プラズマ-壁相互作用, 材料

核融合炉工学に係るプラズマ-壁相互作用、材料について、オーラルセッションの皮切りは IFMIF/EVEDA 事業の進展である。2007年の事業開始から現在に至る重要マイルストーンを総括し、その上で現在進めるフェーズ B+ のビームダンプ統合試験の準備状況と続く超伝導線形加速器との統合試験に関する見通しが示された。次に欧州の材料開発の一環として、先進構造材料の一つである改良酸化物

分散強化 (ODS) 鋼の開発状況が報告された。数10トンクラスへのスケールアップを視野に、ODS 鋼の製造検証が進められた。例えば、モックアップ試験によるき裂進展挙動の評価ではその十分な健全性が示されるなど、工業化に向けた着実な進展が示された。日本からは低放射化フェライト鋼 F82H の材料特性ハンドブックの整備状況が示された。材料強度基準値の整備に加え、我が国の第1回中間チェックアンドレビュー項目である80dpaの重照射の結果が報告された。また、属性ガイドによる課題の見える化が示され、中長期的なデータ整備指針がより明確になった。さらに、DEMO 設計に向けた非比例多軸荷重や構造物の脆性/延性破壊を考慮した構造設計手法などの新たな課題解決アプローチを共有した。米国からは、プラズマ-材料相互作用 (PMI) に係る線形プラズマ装置 (PISCES-RF, TPE, MPEX) の更新状況が示された。具体的には、1) 表面近傍での照射損傷とプラズマ暴露の高い相乗効果を実現し、プラズマ対向材の表面からバルクまでの幅広い変化を対象に、PMI プロセスの幅広い空間及び時間スケール課題を解明する研究が可能になること、2) 各装置には PMI プロセスを in-operando, in-situ, in-vacuo で測定するための診断装置が新たに実装され、これまでにない測定が可能となること、3) 国際共同ネットワークで各装置の利用が可能であることが示されるなど、課題解決に向けた研究開発の加速が十分期待される内容であった。最後に、トカマク・ダイバータにおける不純物の浸食、再付着、ガス滞留を予測するためのマルチフィジックスモデリングアプローチの統合・検証に関する報告がなされた。質疑では、コストや照射試験計画に加え、コロナ禍における課題や懸念が共有された。IFMIF/EVEDA 事業では、遠隔実験ネットワークシステムの導入により、ただでさえ難しい国際協力事業をコロナ禍でも着実に進展することに成功している。今後の研究開発の新しい可能性として、遠隔実験の高いレベルでの実現性の一端を確認できたのは良かった。一方、照射実験など、個の技術に依存する部分では、遠隔での技術継承の難しさがあるとの指摘もあった。いずれにせよ、国際協力を中心に開発が進む核融合炉研究においての人的交流の重要性が改めて共有された。最後に、材料や PMI に関する各論はポスターを中心に議論されたが、残念ながら全体数は少ない印象である。これらの分野を適切にフォローするには、関連トピックスごとの国際会合を良く注視する必要がある。（野澤）

(2) ジャイロトロン

工学分野のジャイロトロンに関する発表は、量研機構、筑波大学、ロシアの応用物理学研究所 (IAP)、ドイツのカーlsruエ工科大学 (KIT) からの4件であった。量研機構と IAP はラポータ方式の口頭発表で行われた。ITER ジャイロトロンは、日本・ロシアともに4本の性能確認試験 (Factory Acceptance Test) を完了させ、ファーストプラズマに用いる8機が完成した。また、量研機構は、ITER での早期 H モードプラズマ実現をめざす 1.8 T 低磁場運転にてプラズマ点火と加熱が可能な 104 GHz (X2 モード) と高磁場運転 (2.65 T/5.3 T) 用の 170 GHz (X2 モード)

ド/基本Oモード)の両周波数で1 MW連続運転を可能とする2周波数ジャイロトロン設計完了を報告した。IAPは、ジャイロトロン新たな発振手法として空洞内に数10 kWの外部信号を入力することで周波数ロックを生じさせ、安定な運転領域を拡張することで345GHzの高周波数でも最大級の発振効率で1 MW出力を可能とするシミュレーションを報告した。筑波大学からは、28 GHz/35 GHzの2周波数ジャイロトロンに関して2重サファイア窓の冷却性能試験と次期装置 pilot GAMMA PDX-SCに向けたGAMMA PDXでの28 GHz ECH試験について、14 GHz/1 MW ジャイロトロンに関して出力効率を改善するためコルゲート導波管を出力部に内蔵する新規設計の報告がされた。KITからは、170 GHz/2 MW 同軸空洞共振器ジャイロトロンと W7-X 向けの140 GHz/1.5 MW ジャイロトロン開発試験を行い、両機ともに短パルス試験にて1.5 MW出力を達成したとの報告がされた。また、同軸空洞共振器ジャイロトロンを用いた204 GHz発振のシミュレーションも行われ、最大1.8 MW出力が可能との報告もあった。

(池田)

(3) 炉設計

炉設計に関わる発表は原型炉を対象とした設計案から中性子源や工学試験炉としての設計案まで幅広く見受けられた。原型炉設計に関わる発表では染谷(QST)から日本の原型炉であるJA DEMOを対象に特に増殖ブランケットの簡素化、正味電気出力の概算、及び安全性に関わる想定起因事象について課題点とそれらの解決案について報告がなされ、"Summary"で原型炉開発に向けた重要な発表であったと評価された。次にUKAEA(英)のO. CroftsからはEU DEMOを対象に遠隔保守方式の概念設計に特化した報告がなされ、遠隔機器による炉内機器の交換手法は炉形状と密接に関係していることから当該設計の構築は最重要課題であると報告された。さらにJ.E. Menard (PPPL)のからは米国の核融合炉パイロットプラント計画などについて報告がなされ、"Summary"ではLi蒸気によるダイバータ部での熱負荷低減概念について注目された。他方、F. Franz (独 KIT), 並びにJ. Morris (UKAEA)からは、プラズマ仕様、核設計、コイル設計、炉形状およびBOP(バランス・オブ・プラント)に関わる多次元のパラメータサーベアーが可能なシステム・デザインコード(PROCESS+MIRA)について報告され、"Summary"では全ての核融合炉の最適化コードとの評価がなされた。さらに、宮澤(NIFS)からはヘリカル核融合炉に向けた開発戦略において、新技術である高温超伝導コイル、ペブルダイバータ及び液体増殖ブランケットの総合試験を目的とした装置について報告された。また、後藤(NIFS)からは、トカマク、ヘリカル、及びレーザーにおける中性子源としての性能を合理的な運用コストでの分析に基づき整理した結果について報告された。今後、炉設計の本来の役割である設計目標(設計値)の具体化による各分野へのフィードバックがますます重要であり、当分野からのIAEA-FECへの寄与が拡大することで、核融合炉開発の加速に繋がると期待される。

(染谷)

(4) ITER・原型炉

以前は区別されていた工学設計・技術開発の3分野は、今回からFusion Energy Technology (TECH)に統合され、4セッション合計21の口頭発表が行われた。その中でITER関連では、日本DAから2020年1月に最初のトロイダルコイルが指定の公差内(mmレベル)で完成しすでにITERへ3機納入されたこと、1 MW, 170 GHz ジャイロトロン8台が完成したことが報告され、特に日本から着実に現地への納入が進められている印象が強かった。日本を始め国際協力によるイタリア担当の負イオンNB製作もRFイオン源の改良や1 MeV プロトタイプ入射設備も完成が近いことが報告された。ITER-IOからは、2028年設置を目標とするシャッターベレットを用いるディスラプション緩和システムについて最終設計案とトカマク実験での物理データ取得が進んでいること、ITERのファーストプラズマに向けたプラズマ制御システム開発の進展状況が報告された。

原型炉関係では各国の設計総括はなかったが進展分野が紹介された。以下、(3)炉設計と一部重複するが、日本からは、ブランケット増殖部の形状をトリチウム増殖率と耐圧の観点から円筒形に最適化した設計とともに送電電力の評価(250 MW)が報告された。欧州からは、遠隔保守の詳細設計とそのボトルネックとなる冷却管の切断・溶接の技術開発などが強調され、並びに従来のシステムコードを含めCADまでを総括した設計プロセスの開発が報告された。米国では従来から建設コストを優先したコンパクトな核融合炉が求められていたが、高磁場・高プラズマ圧力のパイロット装置(SHPD)が近年提案され、高電流密度のTFコイル、低アスペクト比で高い自発電流プラズマ、液体金属ダイバータの技術開発の必要性が強調された。ロシアの企業(Super-OX)から高磁場核融合炉の鍵となる新たな高温超伝導線の生産が報告された。

ダイバータ技術では、プラズマ照射装置Magnum-PSI(オランダ)を使用したW対向材に対するITERで予想される定常・パルス熱粒子負荷に対する寿命評価(レーザーパルス繰り返し、プラズマ熱粒子および不純物イオン照射の影響、熱疲労によるクラック発生など)の総括とともに、IPP(独)からは中性子照射の増加に対して脆化が懸念される銅緩衝材・冷却管に変わりうるWファイバーと銅混合技術、NIFSからは高温で使用可能な酸素物分散強化型銅合金とW対向材との接合強化技術の技術開発の成果が報告された。また、BAで行われた原型炉ダイバータの物理・工学概念設計に関する日欧の特徴と共通点、開発課題の総括が日本側から発表された。加熱技術では、QSTからJT-60SA用0.5 MV負イオンNB(10 MW)の改良が完了し100 s以上連続出力可能となったこと、CEA(仏)からは原型炉に向けた進行波ICアンテナをWESTに設置したこと、MIT(米)からは高磁場側入射用LHランチャーのグリッド個体を銅合金粒子から製作しレーザー溶接して完成したことが発表された。

(朝倉)

5. 慣性核融合 (IFE)

今回 Inertial Fusion Energy (IFE) カテゴリーとしては、プレナリー 1 件 (米国)、口頭発表 4 件 (米国 2 件、日本 2 件)、ポスター 17 件の発表があった。以下では主にプレナリーと口頭発表を簡単にサマリーする。

今回の IFE としての最大のニュースは、なんと言っても米国ローレンスリバモア国立研究所 (LLNL) が進めている National Ignition Facility (NIF) の成果である (プレナリー P. Patel, 口頭発表 A. Zylstra)。NIF は間接照射方式であり、ホーラムと呼ばれる金筒の中心にターゲットであるシェルを置き、全エネルギー 1.6 MJ・192 本のレーザーを金筒の上下の穴からホーラム内壁に照射する。金加熱され輻射される X 線によりシェルを球対称爆縮する。今回の発表では、核融合燃焼による中性子エネルギーが、これまでの最大値の 3 倍、最大 170 kJ に達したと報告された。2012 年の最初の NIF 実験で発生した中性子エネルギー約 10 kJ から、様々な技術的な問題をクリアし、またターゲットやホーラム等のデザインを変えることで、点火のブレイクイーブンの 83% に相当するところまで駆け登った。

192 本のレーザーはホーラム上下の小さい穴を通してホーラム内部を伝播し、内壁面を加熱し X 線を輻射する。加熱されたホーラム内壁面から膨張したプラズマがレーザー伝播路に広がり、レーザー光と干渉することでレーザー光のエネルギーのバランスが崩れる現象 (CBET: Cross Beam Energy Transfer) が、爆縮のパフォーマンスを下げる要因であり、克服すべき課題であった。今回の実験では、これまでより大きなホーラムを使うことでレーザー光とプラズマの干渉を低減し CBET を改善した。さらにターゲットのシェルサイズも大きくし輻射された X 線とシェルの結合効率 (X 線が当たりやすい) を高くすることで、シェル表面に付与されるエネルギー値は 250 kJ と 2019 年の実験での値の 60% 増に改善された。シェルサイズが大きくなったことにより燃料の爆縮運動エネルギーは約 15 kJ と少し減少したが、核融合反応で発生した中性子の総エネルギーは最大で 170 kJ となった。これは爆縮される燃料の運動エネルギーの 10 倍以上、シェルに付与された爆縮エネルギーの約 70% に相当する。コアの中心圧力は 400 Gbar (40 ベタバスカル)、点火条件の指標となる圧力と閉じ込め時間の積 ($P\tau$) は点火要求値の 83% に達し、 α 粒子の燃焼が進行している。ホーラム形状を筒型からラグビーボールのような樽型に大型化することで、輻射源であるホーラム内面からシェル表面への距離を均一化し、レーザー光のエネルギーバランスを改善することでシェルに付与されるエネルギーを 450 kJ に増やす新デザイン (HVAC) も提案されている (口頭発表 Y. Ping)。さらには現在 1.6 MJ である NIF レーザーのエネルギーを 2.6 MJ に増強する計画が進められているとの報告があった。点火への期待が高まっている。

日本からは大阪大学レーザー科学研究所 (レーザー研) から 2 件の口頭発表 (兒玉・河仲) があった。レーザー研では、高速点火方式という高密度爆縮とコア加熱を分離する方式が研究されている。高速点火実験 (FIREX-I 実

験) では、金コーンを付けた中実球のターゲットを爆縮レーザーで固体密度の 10 倍ほどに圧縮した。コーンにより保持された導波路を通して加熱レーザー (1 kJ) をコア近傍まで導入し、高密度コアプラズマを電子温度 2 keV まで加熱に成功したとの報告があった。コア領域の圧力は 22 Gbar (2.2 PPa) と NIF の 20 分の 1 (5%) であるが、使用した全レーザーエネルギーは 4.6 kJ と NIF のわずか 0.28% であり、高速点火方式が高い効率で高温高密度状態を達成できることを示した (兒玉)。新しいハイパワーレーザー開発では、非常に高い繰り返し出力が可能な高出力レーザーの開発が進行していると報告された、既に 10 J/100 Hz のシステムが稼働しており、100 J/100 Hz の Senju レーザーの開発が着々と進んでいる (河仲)。Senju レーザー 100 ユニットで構成されるメガワットレーザーシステム (10 kJ/100 Hz) の J-EPoCH が提案され、データ駆動によるレーザー核融合研究の新しい展開が提案された (兒玉)。100 Hz の高繰り返し実験が可能なハイパワーレーザーは、これまでのレーザー核融合実験と比べ何桁も大量の実験データを蓄積することが可能となる。統計の精度が格段に上がることになり、シミュレーションモデルの高精度化、データ駆動によるインフォマティクスを活用した新たなレーザー核融合研究の展開が期待される。

今回の会議では、欧州からの口頭発表はなかったが、NIF と同じデザインの仏国 LMJ の建設が進んでおり、爆縮実験などが開始され、建設が順調に通りに進んでいることがポスターで報告されている。

FEC2020 では、開催地として南仏ニースを予定していたため、明るい太陽の下、カラフルな市街や賑やかビーチを期待していた参加者も多かったと想像するが、オンライン開催となったのは残念であった。特にオンライン会議でのポスターセッションは盛り上がり欠け、実質的な議論は難しかったのではないだろうか。次回は現地で開催できることを期待したい。(千徳)

6. 革新的・新核融合概念 (IAC)

IAC セッションでは、TAE Technologies (TAE) テクノロジー社より、同社の大型 FRC 実験装置 C-2W に関する Overview が口頭発表された他、11 件のポスター発表が行われた。ポスターの内訳は、ロシア・Budker Institute of Nuclear Physics から磁気ミラーに関するものが 3 件、FRC、プラズマフォーカスがそれぞれ 2 件であり、その他、Z ピンチ、高ベータ球状トカマク、レーザー生成プラズマに関する発表があった。

TAE による Overview 発表では、可変エネルギー NBI (15–40 keV, ~21 MW) により性能が向上した C-2W 装置による FRC 実験の成果が報告された。最長で 30 ms の間、定常維持される電子密度 $\sim 1-2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ の FRC において、3 keV を超えるプラズマ温度が達成されている。また、AI を用いた Google との共同研究などについても報告され、注目を集めていた。TAE の Oral 発表に対しては、会議直前に同社から行われたプレスリリースの影響もあり、今後の開発計画に関する質問が多くなされていた。日本からは、日

本大学における FRC 衝突合体生成の実験結果が報告され、激しい擾乱をうける衝突合体後、FRC が再形成される観測結果が発表された。また、この他に、FRC に関する 2 件の理論シミュレーション研究が、他のセッションで発表された。

磁気ミラーに関する発表は、新たな超伝導マグネットを用いて改良された GDMT (Gas-Dynamic Multimirror Trap) 装置の成果について、ECRH による高ベータ化を達成した実験結果を中心に報告がなされた。Z ピンチについては、ワシントン大学と、同大学発のスタートアップ企業である Zap Energy 社 (Zap) の共同研究の成果として、シアフローにより安定化された重水素 Z ピンチプラズマにおいて $\beta \sim 1$ が達成され、また核融合反応由来の中性子が観測されたとの報告がなされた。一方で、前回イタリアや中国から 4 件の報告があった逆磁場ピンチに関する発表は、

今回の会議では行われていなかった。

IAC 分野では、民間企業を中心に世界的に研究が活発化しており、建設中・計画中のものを含めると世界の核融合装置のおよそ 3 割に当たる約 30 の装置がこの分野に関連するものである。特に民間核融合企業が集中する米国においては、政府が推進する PPP (Public-Private Partnership) の協力もあり、核融合実験装置の約 6 割が IAC に関するものである。例えば昨年度の APS-DPP 会議では TAE 社だけで約 30 件の発表があり、その他民間企業からの発表も多数あった。一方、本会議における民間企業からの IAC 関連の発表は、TAE と Zap のみであり、速報性など様々な観点から、本会議が民間核融合開発の形態に合致していない可能性が伺える。

(浅井)

(原稿受付：2021年 8月 4日)