



インフォメーション

■会議報告

20th International Congress on Plasma Physics (ICPP2022)

佐々木浩一 (北海道大学)
 浦野 創 (量研)
 洲鎌英雄 (核融合科学研究所)
 坂上仁志 (核融合科学研究所)
 稲垣 滋 (京都大学)
 田中康規 (金沢大学)

第 20 回プラズマ物理国際会議 (20th International Congress on Plasma Physics, ICPP) が、2022 年 11 月 27 日 ~ 12 月 2 日の日程で、韓国・慶州市の Hwabaek International Convention Center (HICO) において開催された。慶州は新羅王国の都として栄えた歴史都市で、世界遺産に登録されている石窟庵と仏国寺を有する。韓国人研究者によると現在はリゾート地としての側面もあるとのこと、会議場の近隣にはジェットコースターの施設もあった。慶州へのアクセスは、ソウルまたは釜山からの陸路移動となるが、ソウルからの高速鉄道は非常に混雑していて当日の座席確保が難しく、陸路移動に苦労した日本人参加者が少なからず居たようである。

ICPP は、プラズマの基礎および応用から核融合プラズマまでの幅広い分野をスコープとするプラズマ分野における代表的国際会議である。第 1 回会議が 1980 年に名古屋で開催されたことなどから日本との関係が深く、日本人ベテラン研究者の多くが親近感を覚える国際会議であると思う。第 20 回にあたる今回は、2020 年 6 月に慶州において開催される予定であったが、新型コロナウイルスの世界的流行のために日程が何度か変更になり、最終的に 2022 年晩秋の開催となった。現地組織委員長は UNIST の Hyeon Park が担当した。参加登録者数は 250 名で、バンクーバーで開催された第 19 回会議と比較して参加者数がやや増加した。もしも中国人研究者が参加できる状況であれば、核融合分野を中心に多くの参加者数が得られたものと考えられる。発表論文数は 222 件であり、そのうちの 132 件が招待講演 (プレナリーを含む) で、68 件がポスター発表であった。口頭発表の大半を招待講演とするスタイルは台湾・高雄市で開催された第 18 回会議からの傾向と思われるが、一般論文投稿の意欲を損ねる側面があるようにも思われた。口頭発表の形式は、現地での講演を基本としていたが、一部の欧米からの発表はリモート形式で実施された。筆者が参加したセッションでは、リモートでの講演は非常にスムーズに実施されていた。分野別の発表論文数 (口頭・ポスター発表の合算数) は、磁場閉じ込めプラズマ 76、レーザーおよびビームプラズマ 37、宇宙関連プラズマ 25、プラズマ基礎および計測 29、ダストプラズマおよびプラズマ応用 46 であった。

現在、プラズマ分野は、核融合/基礎プラズマ/低温プラズマ応用/ダストプラズマの様に分類され、国際会議はそれぞれのスコープで別々に開催される場合がほと

んどである。このような中であって、幅広いスコープで全プラズマ分野の研究者が集まることのできる ICPP の存在は貴重である。今後の ICPP の発展に期待したい。

(文責: 佐々木)

1. 磁場閉じ込め核融合 (実験)

プレナリーセッションにおいて、T.S. Hahm 博士 (ソウル国立大学) がトカマクプラズマにおける乱流の理解と輸送低減の進歩に関する講演を行った。磁場閉じ込め核融合関連の講演内容は、ジャイロ運動論シミュレーション、共鳴磁場摂動 (RMP) による周辺局在化モード (ELM) 制御、アルヴェン固有モードの能動的制御、ディスラプション予測、放射ダイバータ制御等の多岐にわたるが、全体としては、バランスよくプログラムされていた。S.A. Sabbagh 博士 (コロンビア大) は、KSTAR におけるディスラプション予測と制御に関する研究成果の講演を行った。KSTAR, NSTX, MAST, AUG, DIII-D, TCV, ST-40 等の複数の装置のディスラプションデータに基づき、プラズマの状態を実時間で「安全」、「近接」、「危険」の 3 段階に分類する DECAF と呼ばれる予測スキームを開発し、98% の精度でディスラプションを予測できることを示した。一方、ディスラプションには様々な要因があるため、密度限界や H-L モード逆遷移等、複数のイベントモジュールに分解し、要因に応じた制御を適用することでディスラプション回避を行うことを示した。浦野 (量研) は、ITER 及び原型炉に向けた JT-60SA におけるプラズマ研究に関する招待講演を行った。JT-60SA は、超伝導コイルにより長時間の高ベータ定常運転を行い、ITER 支援研究及び原型炉に向けた ITER 補完研究を進める。2020 年に装置組立が完了し、現在は総合機能試験が進められている。JT-60SA の運転は、最初の 10 年程度を炭素壁で低衝突周波数へのアクセス等、広い運転領域を確保した実験を実施し、その後、タングステン壁へ移行する計画である。原型炉で求められる総合性能の定常維持に向けた先進的プラズマ制御開発を進めていくことが報告された。

(文責: 浦野)

2. 磁場閉じ込め核融合 (理論・シミュレーション)

会議初日のプレナリーセッションにおいて、昨年度の Chandrasekhar Prize を受賞した T.S. Hahm 博士 (韓国ソウル大学) が、トカマクプラズマにおける乱流輸送とその低減機構に関する講演を行い、これまでの理論・シミュレーションおよび実験の進展を振り返りながら、自身が導いた $E \times B$ シアーによる乱流抑制条件の公式や乱流の非局所性や伝搬現象等について解説した。C.S. Chang 博士 (米国 PPPL) は、大域的ジャイロ運動論コード (XGC) によるトカマク周辺乱流シミュレーション研究に関する講演を行い、ITER では、セパトリクスを跨ぐ捕捉電子モード乱流による影響により、ダイバータ熱負荷幅の増大が予測されることを示した。P.H. Diamond 博士 (米国 UCSD) の講演では、トカマクにおける LH 遷移現象や密

度限界に関わる周辺プラズマの $E \times B$ シア構造の生成と消滅に関する理論研究の進展について、レビューがなされた。核融合科学研究所の数値実験炉研究プロジェクトにおいて行われてきたヘリカル系プラズマの新古典・乱流輸送シミュレーション研究の進展について、洲鎌が講演を行い、LHD プラズマの不純物ホール現象、同位体効果や乱流輸送モデルに関する研究成果を示した。

R. Dewar 博士 (オーストラリア国立大学) は、理想 MHD におけるゼロ抵抗のオームの法則の条件を、抵抗拡散を用いずに緩和することにより磁気リコネクションのようなトポロジー変化を可能とする緩和磁気流体力学の定式化について報告した。Zhang 博士 (中国浙江大学) は、二流体効果を入れた MHD シミュレーションを実行し、トカマクにおける小振幅の鋸歯状振動現象が電子反磁性効果による不完全な磁気リコネクションによって説明できると報告した。M. Garcia-Munoz 博士 (スペイン・セビリア大学) および A. Bierwage 博士 (量研) から、ともに運動論-MHD ハイブリッドコード (MEGA) を用いたシミュレーション研究に関する講演がなされ、それぞれ、高エネルギー粒子輸送アルフベン固有モードの能動的制御ならびにアルファ粒子の選択的閉じ込めについての成果報告を行った。DIII-D トカマク実験における高エネルギー粒子輸送の統合シミュレーションの検証ならびに ITER の運転シナリオの予測に関して、大域的ジャイロ運動論コード (GTC) を用いたシミュレーション研究の報告が、米国 UCI の理論シミュレーショングループからなされ、高エネルギー粒子損失が、ミクロスケール乱流、メソスケールのアルフベン固有モードおよびマクロスケールの MHD モードの間の非線形相互作用に依存していることが示された。F. Poli 博士 (米国 PPPL) は、ITER プラズマの解析と予測のためのフレームワークを提供する統合モデリングについて、ITER の運転に向けた具体例を挙げながら、モデルの現状や課題を報告した。

瀬戸博士 (量研) の講演では、トカマク周辺乱流シミュレーションコード (BOUT++) を全トロイダル角領域へ拡張し、トロイダルモード数 $n=0$ のフロー、低 n MHD モードおよび高 n 乱流の間の相互作用の計算が可能になったことが報告された。矢木博士 (量研) は、簡約化ドリフト MHD モデルに基づく大域的流体シミュレーションを実行し、ガスパフやペレット入射などによってトカマクプラズマ周辺部にホロー密度分布が形成された場合における粒子輸送の解析結果を報告した。岸本博士 (京都大学) は、内部輸送障壁の物理機構解明を目的とした大域的ジャイロ運動論コード (GKNET) を用いた反転磁気シア配位トカマクプラズマの乱流輸送シミュレーションについて講演した。X. Garbet 博士 (シンガポール南洋理工工科大学) は、3 次元摂動磁場の存在するトカマクにおけるシア一流の生成・減衰に対する乱流・衝突の効果について、大域的ジャイロ運動論コード (GYSELA) を用いたシミュレーションによる解析結果を報告した。G.J. Choi 博士 (韓国ソウル大学) は、無衝突トカマクプラズマ中の磁気島における自己生成渦流の減衰・残留レベルについて、ジャイロ運動論に基づく解析計算結果を報告した。

会議最終日のプレナリーセッションにおいて、A.

Bhattacharjee 博士 (米国プリンストン大学) は、数学者・コンピュータ科学者・プラズマ物理学者からなる先進的な準対称性ステラレータ配位に関する国際共同研究の成果について講演を行い、新たな手法で得られた高精度の準対称性を有する磁場配位の例を示した。ポスターセッションでは、KSTAR における乱流輸送に対する高速イオンの効果についてのジャイロ運動論解析や KSTAR における ELM 制御に関わる MHD モデリング等、開催国である韓国の研究グループからの発表が目立った。

(文責：洲鎌)

3. レーザービームプラズマ・慣性核融合

レーザービームプラズマ・慣性核融合関連のセッションとして、プレナリー 2 件、招待講演 17 件、口頭発表 7 件、ポスター発表 11 件の発表があった。米国 National Ignition Facility (NIF) に関するプレナリーでは、H.S. Park 氏 (LLNL) による丁寧な実験結果の解説があった。1.35 MJ の核融合出力を達成した 2021 年 8 月 8 日の実験結果は、2022 年 9 月 19 日および同年 11 月 7 日の実験でも、ほぼ再現できたとのことであった。詳細な解析の結果、核融合出力劣化の原因は、ホットスポットのずれ、形状および混合だと考えられるため、ターゲットの更なる高品質化、レーザー照射条件の最適化等の対策を講じ 2023 年にはレーザーの出力を 2.2 MJ まで増強して、次の慣性核融合実験に臨むとのことであった。

慣性核融合関連の口頭発表では、P. A. Norreys 氏 (Univ. of Oxford, UK) から低収束比爆縮と外部加熱を用いる手法をマルチスケールなシミュレーションにより解析した結果について、講演があった。なぜか、高速点火とは明言しなかったが、明らかに高速点火に回帰している印象を受けた。また、S. L. Pape 氏 (LULI, France) により、Laser Mega Joule (LMJ) の現状報告があった。現在、10 セット 80 ビームと短パルスレーザーの PETAL が稼働しており、3 セット 24 ビームが最終テスト中であり、2027 年には、最終構成である 22 セット 176 ビームが完成予定である。また、ラグビーボール型フォーラムを用いた間接照射による爆縮実験も行われており、3 次元流体コードのベンチマークに利用しているとのことであった。

一方、韓国でもレーザーシステムが順調に立ち上がり、基礎実験において成果が出始めている印象を受けた。

(文責：坂上)

4. プラズマ基礎・診断・宇宙

本カテゴリーでは口頭発表 15 件、ポスター発表 15 件が行われた。前回の ICPP2018 から比べるとポスター発表件数が減少しているが、口頭発表数は増えている。今回の会議における Plasma Diagnostics & Space Instrumentation カテゴリーはセッションが一つだけであったが、そこでは核融合プラズマ、超音速プラズマ、低温プラズマと多様なプラズマにおける計測法が発表された。計測は全てのカテゴリーに共通した重要なトピックであるので今後の発表件数の増加に期待したい。Basic Plasma Physics カテゴリーは例年のように、乱流、不安定性、波動粒子相互作用と非常に多様なテーマをカバー

していた。その中で、今回は磁気再結合に関する講演が多かった。Basic Plasma Physicsのカテゴリーでは“Magnetic Reconnection”と題したセッションが行われた。この中で Forest 博士 (UW-Madison, 米) による“Overview and Recent Highlights from the Big Red Ball Device, Winds, Shocks, Reconnection, and Dynamo”という講演が個人的に非常に興味深かった。プラズマの実験家は、宇宙のプラズマ現象を実験室で再現する、というアイデアに一度は取り組んだことがあるのではないだろうか。今回報告された SmCo 磁石を用いた Big Red Ball の磁場構造とそこに閉じ込められたプラズマの特性から新たな着想を得る実験家も多いと思われる。磁気再結合は、宇宙・天文プラズマのカテゴリーにおける“Solar Plasma and Related Experiments”, “Magnetic Reconnection and Turbulence”というセッションで、また磁場閉じ込め核融合のカテゴリーの“Fast Particle and Merging”というセッションでも議論されており、更に山田博士 (Princeton Univ., 米) が“Recent Advance in the Research of Magnetic Reconnection in Laboratory Experiments and Space”と題したプレナリー講演を行う (残念ながら online 講演でした) など、非常に広い領域から関心の高いテーマであった。日本からは 3 件の招待講演を通じて、このテーマに大きく貢献している。

本カテゴリーに参加していた方から、磁場閉じ込め核融合 (理論・シミュレーション) カテゴリーでの Bhattacharjee 博士の“Hidden Symmetries and Fusion Energy”と題したプレナリー講演が非常に興味深かった、とのご意見をいただいた。このような広く関心の高いテーマを介して、異なるカテゴリー間の議論が今後融合深化するのでは、との期待が高まった。

(文責：稲垣)

5. プラズマ応用

今回の ICPP2022 のプレナリー講演 8 件の中には、低温プラズマ・プラズマ応用からプラズマバイオ医療に関するもの 1 件、半導体プロセスプラズマに関するもの 1 件の合計 2 件があり、ICPP2022 のトピック内での重要性がうかがえた。セッションもそれを反映し、プラズマバイオ・農業応用が 3 セッションで最も多く、半導体プロセス応用、エネルギー・材料応用、応用プラズマ物理が各 1 セッションであった。

プレナリー講演のプラズマバイオ医療関係は韓国の Choi 博士からであった。大気圧非熱平衡プラズマジェットを用いたウイルスが不活化する基本的なメカニズムの考察、プラズマ照射により生成される一酸化窒素水 (NO-PAW) による新型コロナウイルス不活化の発見、さらに NO-PAW を用いた新型コロナウイルスを含む抗ウイルス治療の臨床開発に向けた動きが紹介された。プレナリーの半導体プロセス分野でも韓国からの発表であり、サムスンの Bai 博士からであった。半導体プロセスで従来用いられてきたプラズマ源の開発として、CW からパルス駆動の導入、バイアス、高密度化、電子温度・密度の制御などの紹介とともに、ALD/ALE、ダメージを与えない弱いプラズマの重要性など課題の紹介がなされた。

今回の ICPP2022 では各一般口頭発表セッションはほ

とんど招待講演者が配置された。プラズマ医療・バイオ・農業応用の分野においては、Masur 博士 (独) による糖尿病患者の慢性創傷の治癒促進に低温プラズマ使用する試みについて、白谷博士 (日) による新分野としてのプラズマ農業応用、Lim 博士 (韓) からは医療インプラント用のプラズマ表面処理について招待講演があった。佐々木博士 (日) から電子温度を極低下させたプラズマ内の低エネルギー電子による振動励起 N_2 分子の効率的な生成について、Nikiforov 博士 (ベルギー) からはパルス非平衡プラズマによる窒素固定化における反応動力学からエネルギーコストの話題、高木博士 (日) からパルスパワーを用いた農業・食糧問題応用の最前線、Moon 博士 (韓) から大気圧プラズマによる選択的気液作用の機能性表面への応用、金子博士 (日) からプラズマにより生成された不安定な窒素を用い、高い反応性を有する N_2O_5 などの機能性窒素化合物を合成し、これを細胞機能の制御に応用することが報告された。

半導体プロセス分野における招待講演においては、サムスンの Nam 博士から半導体プロセス分野におけるプラズマ数値解析技術、Shannon 博士 (米) から汎用ソフト LAMMPS を用いた MD 解析から高アスペクトエッチングにおけるイオン照射角依存性などについて、Koo 博士 (米) からイオン注入装置におけるプラズマ制御の重要性、Park 博士 (韓) から有機ディスプレイ製造においてプラズマ情報ベース仮想計測 (PI-VM) を用いたプラズマプロセス予測により生産効率が大幅に向上した報告がなされた。

応用プラズマ物理分野においては、Choe 博士 (韓) から大気圧プラズマジェットによるケルビン・ヘルムホルツ不安定性の安定化に対する現象の発見とその物理的理由、Mozetic 博士 (スロベニア) からポリマー表面のプラズマ改質に関する科学的・工学的考察、Celbar 博士 (スロベニア) から低次元材料を含む様々な新規バッテリー材料へのプラズマナノテクノロジーからのアプローチの発表がなされた。

エネルギー・材料へのプラズマ応用分野においては、Van de Sanden 博士 (蘭) から再生可能エネルギーを用いたプラズマプロセスの重要性、 CO_2 分解のための振動励起の重要性、そこから発案した新リアクタの提案などが報告された。田中 (日、筆者) からは二コイルのタンデム型変調誘導熱プラズマによるプラズマ安定維持と大きな変動場を実現するとともにこれを大量ナノ粒子生成に応用する実験と統合数値解析モデルの発展を報告した。Choi 博士 (韓) からは、DC 熱プラズマを用いた一次元の B 系ナノ材料の高速生成と水素導入の効果について発表があった。

新型コロナ明けの対面の国際会議であり、特に応用分野では医療・農業・バイオ・エネルギー・グリーンといったキーワードに対して、様々なプラズマ応用研究展開が世界で継続されていることを感じられた。

(文責：田中)

(原稿受付：2023 年 1 月 26 日)