



本会記事

■第8回核融合エネルギー連合講演会報告

1. 概要

核融合エネルギー連合講演会は本学会と日本原子力学会が2年毎に主催するものであり、今回は本学会が主に担当して2010年6月10日と11日の2日間、岐阜県高山市の高山市民文化会館において開催した。副題として「新たなエネルギー革命を起こす科学技術“核融合”」を掲げ、幸い好天にも恵まれ、388名の参加者を得て、海外からの招待講演を含む約330件の講演とともにこの研究開発の在り方や今後の進め方について広範な議論を展開する場となった。

本講演会の主旨となるポイントを以下のように組織委員会（本島修委員長）が中心となって設定した。核融合エネルギーの研究開発は核燃焼プラズマの実現や関連工学技術の統合をめざすITERプロジェクトの推進、原型炉に向けての設計活動や炉材料に代表される研究開発の加速と具体的なロードマップの検討等、世界的規模でのエネルギー開発という今日的意義にこたえるべく、新たな段階へしかるべく移行していく必要があること、この核融合エネルギーの研究開発は太陽の中心核の10倍以上の温度をもったプラズマを体系的に理解するという基礎学術研究と共に進展して来たものであり、核燃焼プラズマ実現という新たな段階においては、学術基盤とITERに代表される研究開発の前線との協働作業がますます重要になってきたこと、さらに、この核融合研究分野がビッグサイエンスであることの意義と価値を、核融合コミュニティが、他の研究分野と社会に対してアピールしていくことが重要であること、である。

開式にあたり、本島修組織委員長より、講演会参加への謝意と主旨説明がなされ、高山での講演会が記憶に残る議論への期待が述べられた。来賓の箱崎慶一文部科学省大臣官房審議官からは激励の言葉とともに巨額の投資に対するリターンは誰のものか、という問いがあり、同じく来賓の荒井信一高山副市長からのエネルギー・環境問題解決に向けた思いと合わせて、本講演会を通じてのテーマへの取り組みを鼓舞するものとなった。

プログラム委員会（寺井隆幸委員長）では開催主旨に沿い、「核融合エネルギー開発研究の展望」と「プラズマ・核融合研究の広がり」という2本柱の基調講演セッションを軸として、5つのシンポジウムと「将来のエネルギー戦略と核融合の割合」と題したパネル討論を設定した。

最初の基調講演セッションでは、国際熱核融合実験炉（ITER）についてまもなく本格化する建設への準備状況について、組み立て・運転部門の責任者であるK. ブラックラー博士から、来年にも燃焼実験を試みる米国国立点火施設（NIF）の近況と展望について、D. モーゼス所長から、

そして我が国が大規模な国際協力事業を初めてホストする例ともなる幅広いアプローチの現況と展開について、実施機関である日本原子力研究開発機構の二宮博正核融合研究開発部門長から、報告された。これらの開発ミッションを担う大型プロジェクトと対となるものが、研究の広がりや学術的なアプローチである。大型ヘリカル装置実験を基盤とした定常核融合炉への研究展開について、小森彰夫核融合科学研究所長から、高強度レーザーによる核融合と高エネルギー密度プラズマ科学の展開について、疇地宏大阪大学レーザーエネルギー学センター長から、プラズマの産業応用の進展と今後の展望について、白谷正治九州大学教授から、二つ目の基調講演のセッションで議論がなされた。

シンポジウムは、核融合炉実現に向けた学協会連携と若手による展望という横糸と、シミュレーション、炉工学、モニタリング制御という縦糸から構成された。多様な観点から核融合の役割が議論されたパネル討論は一般にも公開する形で行った。

一般発表はポスター形式として行い、300件の報告がなされ、2つあるポスターセッション会場は、どちらも熱い議論で盛り上がった。特に、大学院生から学位取得後5年以内と設定した若手が140名に上り、本講演会がカバーする活動の将来を明るく照らすものと心強く感じられた。これらの若手の中から15名の「優秀発表賞」が選ばれ、閉会式において授与された。

また、これらの会場での議論と合わせて、重要なものが懇親会における議論である。懇親会は「まつりの森」ミュージアムスペースで行われた。「まつりの森」は絢爛豪華な高山祭の屋台を現代のロボット技術を合わせて復元し、空調設備が不要となるよう山の斜面を掘削して創ったドームに動体展示しているところである。300年以上の伝統を培ったものは、参加者にもある種のヒントを与えたのではないだろうか。さらに、講演会前日には東京大学宇宙線研究所神岡宇宙素粒子研究施設にご協力いただき、スーパーカミオカンデの見学会も催すことができた。

次回は日本原子力学会が主となり、関西方面で2012年に開催されることである。最後に、講演会開催にあたって全面的にご協力いただいた高山市とコンベンションビューローを始めとする関係の方々、賛助金を賜った団体*、および講演会を円滑に運営することに労を惜しまなかった現地実行委員会とプラズマ・核融合学会事務局の皆様がこの場をかりて御礼申し上げます。

（現地実行委員会委員長 山田弘司）

*賛助金をいただいた機関（50音順）

IFEフォーラム、核融合科学研究会、川崎重工業(株)、(株)東芝、日揮(株)、(社)日本建設業団体連合会、(独)日本原子力研究開発機構、(株)日立製作所、富士電機システムズ(株)、

三菱重工業(株), 三菱電機(株), 未来エネルギー研究協会

2. 基調講演Ⅰ. 核融合エネルギー開発研究の展望

現在の核融合エネルギー研究開発の大きな流れとして、磁場閉じ込め方式と慣性閉じ込め方式があり、これらに関して世界規模での研究開発が行われている。前者はトカマク方式であり、日本、ヨーロッパ連合、米国、ロシア、中国、韓国、インドの7局の共同プロジェクトとして実験炉建設が開始された国際熱核融合実験炉 (ITER) 計画と、日欧で共同研究が開始されている「幅広いアプローチ」(Broader Approach) 計画が国際的に展開されている。一方、後者は高強度レーザーをターゲット加熱のドライバーとするものであり、米国の National Ignition Facility や我が国の FIRE-X などの研究開発などが実施されている。基調講演Ⅰでは、これらのうち、ITER プロジェクト、幅広いアプローチ活動、米国の慣性核融合炉実験計画に関する基調講演3件が行われ、活発な議論が交わされた。

「Present Status of ITER (Ken Blackler 氏・ITER 機構)」では、ITER 計画の概要、組織、年次計画、実験炉建設の現状、今後の計画が述べられた。核燃焼の開始時期は当初計画からやや遅れる見通しとなったが、サイトの建設や職員の採用等は順調に推移している。実験炉の機器が各極からの物納によって行われることから、特に、さまざまな機器の組み立てやプラントの設置などにおいて、システム統合の考え方が重要であるということが強調された。

「幅広いアプローチ (BA) 活動の現況と今後の展開 (二宮博正氏・原子力機構)」では、Broader Approach 計画の概要、実施体制、それぞれの要素技術の説明、年次計画などが紹介された。BA 活動は茨城県那珂市に建設されるサテライトトカマクと青森県六ヶ所村に建設される国際核融合エネルギーセンター (ITER 遠隔実験センター、核融合計算機シミュレーションセンター、原型炉設計・R&D 調整センター、国際核融合材料照射施設工学実証・工学設計活動から構成される) の2つで構成されるが、ITER 計画と相補的に実施され、原型炉の実現のために必要な技術開発を行うためのものである。ITER 計画が30年以上の長きにわたって実施されるのに対して、BA 活動は10年間の予定であり、ITER 計画との期間の整合性、BA 活動終了

時以降の設備の運用等について、質疑応答がなされた。

「The National Ignition Facility and the Path to Inertial Fusion Energy (Edward Moses 氏・LLNL)」では、米国の National Ignition Facility 計画の概要がムービー入りで紹介され、それをベースとした慣性核融合炉への研究開発の道筋が紹介された。NIF は世界最大および最強のレーザー実験装置であり、核融合エネルギー開発のみならず、高エネルギー密度科学や天体物理学の研究にも大きな貢献を行うことが考えられる。今後は、国内外の共同研究のためのプラットフォームとしての利用も視野に入れているとの説明がなされた。

(座長：東大 寺井隆幸)

3. 基調講演Ⅱ. プラズマ・核融合研究の広がりと将来

核融合エネルギー研究開発の ITER 建設期への展開、自然エネルギー活用やエネルギー高効率化への新エネルギー開発の展開、という時代にあって、プラズマ理工学や核融合科学がどのような牽引力を発揮できるかという展望は、本連合講演会の大きな主題である。この視点から、大学共同利用研究機関と LHD の展開、レーザー核融合と高エネルギー密度科学、プラズマ応用研究をテーマとして3件の基調講演が行われ、活発な討議が行われた。

「大型ヘリカル装置実験を基盤とした定常核融合炉への研究展開 (小森彰夫氏・核融合研)」では、LHD を中心とした核融合科学研究所の最新成果と将来展望が語られ、LHD 重水素化による高温プラズマの実現をめざした計画、数値試験炉計画、炉工学研究計画が述べられ、それをめざした組織改編が説明された。次期・次次期中期計画でこうした研究を完遂し、その後ヘリカル系が原型炉研究へと発展するとともに、高性能炉をめざした基礎研究へと転換する案が述べられた。

「高強度レーザーによる核融合と高エネルギー密度プラズマ科学の展開 (疇地宏氏・阪大)」では、日本が展開させた高速点火方式の進展が述べられた。追加熱パワーを高めた GEKKO LFX レーザーが実現し初期実験が行われた。レーザーパルス幅の効果などが研究され、高強度レーザー場の中での高速電子や自発電磁場の重要性が確認された。日本で実現された「プラズマフォトリックデバイス」



が果たす重要な役割が述べられ、今後の高エネルギー密度科学が説明された。

「プラズマの産業応用の進展と今後の展望（白谷正治氏・九大）」では、半導体産業におけるムーアの法則を始め、近年の太陽電池産業の展開等、その指数関数的急成長を実現させてきたのがプラズマプロセス科学の存在だったことを述べ、太陽電池パネルの製造を例にとりてプラズマ科学の果たす役割を描いた。その他バイオプラズマ等の新しい広がりも述べた。今後のプラズマプロセスの高性能化や気液界面プラズマの制御といった発展にとって、揺らぎの制御が重要であることを説明した。

会場からは多数の熱心な質疑があった。小森講演では、LHD研究に対し「学術研究としては15年前に掲げた数値を目標として進むというより研究の展開に応じた新しい目標を掲げるべきではないか」という提言が松田慎三郎前学会長からあり、三間教授より「数値実験炉の提案を歓迎するが、具体案には改善の余地がある」などのコメントがあった。疇地講演には「高エネルギー密度科学の進展にとって大出力レーザーの技術的進歩とプラズマフォトンクスによる制御物理との二つが如何に重要か」との質問があり、白谷講演には本島会長から「プラズマ・核融合コミュニティからプラズマ応用へ今後どのような寄与ができるか」というエールが寄せられた。ITERの展開等新しい時代に向けて、学術研究の新たな展開を期待する熱い声が上がったことが印象的であった。力のこもった講演と充実した質疑を通して、核融合エネルギー研究とプラズマ理工学研究の発展と課題が描き出されたことは大きな成功であった。

（座長：九大 伊藤早苗）

4. シンポジウム I. 「核融合炉実現に向けての学協会連携」

本核融合連合講演会はプラズマ・核融合学会と日本原子力学会核融合工学部会との共催により隔年開催してきており、今回第8回を迎えることになった。一方、核融合エネルギーの開発の現状を俯瞰するに、今やITERや幅広いアプローチ活動が始まり、これからは発電（原型炉）に向かってより幅広く研究者・技術者の知見の積み上げ、意識の集約を踏ることが重要となってきている。原型炉は開発要素が多く研究者が取り組まなければならない部分と、製作技術が重要で産業界の技術者が取り組まなければならない部分とがある。加えて原型炉はITERまでの核融合装置にはない、エネルギーシステムとしての新たな技術を含めて成立するものであり、これまでの連合講演会の範囲を超えた科学技術・学術分野の研究者・技術者の知見の交流と議論の場が必要となってきている。以上の主旨に照らし、機械学会、電気学会、産業界が核融合炉開発とどのように見ているか、関わっているかをご紹介いただき、現状を理解した上で学協会連携をどうすべきか議論することが本シンポジウムの主旨であるとのコメントが座長よりなされた。

まず、機械学会の中曽根祐司氏（東京理科大）から「核融合炉の設計、建設に関わる機械系コミュニティの取り組み」のテーマで機械学会で組織的に行われた核融合用超伝

導コイルの設計基準策定を中心として、また電気学会の岡本達希氏（電中研）から「核融合炉実現のための電気系コミュニティの役割」と題してスマートグリッドの話の延長上に核融合炉がネットワークに繋がるときの課題などについて、また、産業界からは近藤光昇氏（原産協会）により「核融合炉開発における産業界からみた学協会連携のあり方」のテーマで国による開発計画の策定、技術の伝承のために研究機関、産業界の人材育成が急務であることなどの紹介があった。これらの分野からの報告でも明らかのように、核融合炉を実現するには、今後は、統合設計から求められる各分野（プラズマ、機器、サブシステム）の課題を専門的に追求し、解決する努力とともに、各分野の成果や進展を取捨選択しながら設計に反映していく統合作業が益々重要になってくる。このため、電気、機械、熱流体、極低温、放射線、化学プラント、プラズマ制御など幅広い分野の専門家が核融合炉の具体像を描きながら議論する場が必要と再認識された。

シンポジウムを締めくくるにあたって、座長から次回2年後の連合講演会のタイミングで原型炉設計者が企画の推進役となって核融合炉（原型炉）をテーマとして電気学会、機械学会、低温工学協会、原産協会、高温学会、放射線学会、日本原子力学会、プラズマ・核融合学会学協会連携主催の特別企画シンポジウムを開催してはとの提案があり、賛同者が拍手で締めくくった。

（座長：原子力機構 松田慎三郎）

5. パネル討論「将来のエネルギー戦略と核融合の役割」

最初に登壇した小川雄一氏からは、核融合研究の現状と将来計画の説明があった。着実なパラメータの進展とITER計画が紹介され、原型炉以後の計画については2050年実用化をめざす計画が示された。最後に、核融合は数千年にわたり人類に寄与できる「人類の夢である」と見解を結んだ。

長野浩司氏は、エネルギー戦略の観点から意見を述べた。国のエネルギー政策文書を概観すると、エネルギー戦略の視界（2030年ないし2050年まで）に核融合は入っておらず、「広汎な関連科学・技術のイノベーション・プラットフォーム」としての期待に言及があるのみであり、核融合と並んで多数の候補（CO₂利用技術、再生可能エネルギー、FBR、高温ガス炉など）が挙げられている。また、IT企業（マイクロソフト、Google）がエネルギー技術開発に積極姿勢を見せていることも見逃せない。核融合が多くの人ライバルに埋没しないためにも、以下4点を指摘したい。1) マーケティング戦略が必要であり、メリットの現世代（納税者）への訴求を考えるべき。2) 庶民感覚でScalableでない核融合技術は、その意味でハンディキャップを負っている。3) 核融合には、開発のリスクペナルティを凌駕してあまりあるほどのメリットが必要である。4) 国でなければ推進できないことは理解するが、逆に民間部門でも推進できることを示すことができれば、上記Scalableの実感に資する。

久保田健一氏は、産業界の視点から見識を述べた。FBR

も含め原子力は世界のエネルギー安定供給の要である。しかし、日本の核分裂は米国のコントロール下に置かれている。産業界の視点で核融合に期待するのは、「軍事に依存しない技術フロンティア」であり、実現後は「市場が世界となる」点である。開発は長期にわたるので、ロードマップに沿った息切れしない予算処置があれば、さらに経営資源を投入したい、と産業界が考える対象となりうる。

駒橋徐氏は、ジャーナリストの視点から意見を述べた。化石エネルギーは枯渇より価格の制約が支配的になる。そこに新エネルギーの役割があるが、核融合はまだ科学の世界であり、エネルギー開発に至っていない。実験炉はできても、本当に実用炉として使えるのかとなると、格差が大きいといわざるを得ない。実用化への疑問に答えるためにも、安定燃焼の実証をすべきである。また、核融合科学者が科学講座を開いて、小さい時から科学に興味を持たせることや、マスコミへのPRを繰り返し行うことなどを長期的視点で考えるべきである。

畑山明聖氏は、大学教育に加え、スーパーサイエンスハイスクール（SSH）の講師の経験などに基づく意見を述べた。航空機を例にとれば、60年代の人々は世界旅行という夢を共有し、その後の航空機デザインの潮流が決まった。今の中・高生が核融合に持っているイメージをアンケートで調べると、夢というより軍事というイメージが多く、エネルギー技術との認識は薄い。ただし、核融合の講義を聞いた生徒ではこの関係は逆転した。今後、ひとりでも多くの人々と核融合開発の夢を共有していくには、コミュニティから外に出て、息長く、正確な情報を伝えることが必須である。

討論では、「メリット享受者は納税者であるべき」という通常の負担-受益論と、「人類にとっての夢」と説明することの落差についての議論もあった。結論は容易に出ないが、核融合開発が税金の投入で進んでいることへの責任感重要である。筆者が本討論会に参加し、講演と討議を通して強く感じたことは、核融合が「人類の夢」であるにしても、50年以上もコミュニティ外に対してメリットを生み出さないというのでは説得力に乏しく、イノベーション・プラットフォームとしての役割も果たして技術波及を推進すること、一般に対して進展状況や展望を説明することにも片手間でない力を注ぐこと、ロードマップに沿って実用化を着実に進めることなどが、核融合研究の今後の展開に必須であることの再認識である。

（モデレータ：電中研 岡野邦彦）

6. シンポジウムⅡ。「若手研究者の考える“20年で核融合炉を実現する方法”」

インパクトの大きなタイトルを掲げた本シンポジウムでは、2030年代の核融合原型炉稼働に責任を負うべき世代の研究者らによって、しっかりと地に足のついた議論が展開された。本シンポジウムの企画は、ここ数年活動を行ってきた「核融合炉実用化若手検討会」の幹事らによって半年の間練られたものである。本連合講演会のため、5月にも「若手検討会」が開催され、そこで出された若手研究者の意

見も本シンポジウムに反映された。

最初に谷川博康氏（原子力機構）から趣旨説明があった。本シンポジウムでは2030年代の原型炉稼働を目標に、各方式の炉システムとしての成立性を議論すること、原型炉は様々な（異分野の）先端科学技術を総合したものであり、異分野間の理解を深めるためには各技術の現状を評価し、合意形成を図るためのツールが必要であること、またそのツールとして技術成熟度（TRL：Technology Readiness Levels）が有用であることなどが述べられ、今後若手研究者で各方式におけるTRL評価を行っていくが、本シンポジウムでは現状での議論を紹介する旨の説明があった。

次いで日渡良爾氏（電中研）から「トカマク型原型炉の場合」とする報告があった。喫緊のマイルストーンとして2014年の原型炉一次仕様決定があり、これに向けてメンテナンス手法など現時点でのTRLは低いが炉形状の選定に決定的影響を与える課題の開発を加速すべきこと、および原型炉開発活動体制を構築する必要性があることなどが述べられた。

後藤拓也氏（核融合研）からは「ヘリカル型原型炉の場合」として、LHDの成果によってヘリカル型原型炉が見通せるようになったという報告があった。経済性の向上やトリチウム増殖比1以上の確保が必ずしも原型炉の必須条件ではないという考え方が述べられ、全面増殖ブランケット設置に拘らず、十分な規模の発電実証が可能でかつ柔軟な運用のできる原型炉設計案が提示された。

藤岡慎介氏（阪大レーザー研）からは「レーザー型原型炉の場合」についての報告があった。個人的に検討したものとして、炉心プラズマ・炉用レーザー・燃料供給に関して抽出した課題とそれぞれのTRL評価が紹介された。磁場プラズマ研究との連携の重要性、死の谷の有無を確認するためのプロジェクトの必要性を述べた上で、レーザー型原型炉が実現された場合に日本発の技術がいくつ採用されるかが本当の勝負であるというメッセージが発せられた。

3方式の議論に引き続き、笠田竜太氏（京大エネ研）から「原型炉実現のために取り掛かるべき共通課題」についての報告があり、TRL設定の案とブランケット開発を例としたTRL評価が紹介された。さらに、基礎研究から実用化までの間に存在し得る死の谷を越えるためのブレークスルーを生み出すためには基礎研究と応用研究（あるいは可能なことと必要なこと）の両側面を有する「根本的研究」が重要であり、これに注力可能な研究チーム・組織の早急な構築と継続的投資が必要であるとする議論が展開された。

本シンポジウムの最後に「課題解決に関する全体討論とまとめ」が行われた。まず大山直幸氏（原子力機構）から、5月に開催された核融合炉実用化若手検討会でのコメントについての紹介があり、特にトリチウム関連の課題、即ち初期装荷や増殖比、取り扱い技術と経験の不足、建設候補地の了解や法整備について懸念する声が多かったこと、若手検討会では今後も組織や領域を横断した活動を行い、TRL評価を進めていく予定であることが述べられた。その後発表者を壇上に招いて会場との質疑討論が行わ

れた。若手同士で各方式における具体的課題に踏み込んだ質疑が交わされた他、年長者らからも原型炉実現に向けた若手の活動を支持するコメントを多数いただくことができ、次へ繋がる形で成功裡にシンポジウムを終了した。

(座長：核融合研 宮澤順一)

7. シンポジウムⅢ「核燃焼プラズマにおけるシミュレーションの役割」

近年の計算機の発展に伴い、核融合研究においても数値シミュレーション研究が長足の進歩を遂げてきている。特に、昨今、このようなシミュレーションによって、核燃焼を想定したプラズマに対する展望や問題点が明らかになりつつある。そこで、本シンポジウムでは、3人の方に、このような核燃焼プラズマをターゲットとした最先端のシミュレーション研究を紹介していただいた。

最初の講演では、長友英夫氏(阪大レーザー研)によって、「多階層シミュレーションによる高速点火核融合」と題する、レーザー核融合の核燃焼に関するシミュレーション研究が紹介された。まず、レーザー核融合での二つの大きな点火方式である、中心点火方式と高速点火方式が非常にわかりやすく説明された。アメリカでは中心点火方式が主流であるのに対し、日本では高速点火方式を基軸とした研究がなされているとの報告があった。その後で、それぞれの方式における、燃焼に向けたシミュレーションコード開発の現状が紹介された。中心点火方式に関しては、輻射流体力学コードをベースとした高いレベルの爆縮シミュレーションコードが完成しており、特にアメリカでは、NIFの実験結果をフィードバックすることによってコードの精度向上が見込まれるとのことである。これに対し、高速点火方式においては、輻射流体、PIC、Fokker-Planck等の手法を用いた階層化手法による統合化が進められているが、まだ、相対論的レーザープラズマ相互作用や高速電子輸送等において一部未知の非線形物理が含まれているとの報告がなされた。

2番目の講演では、矢木雅敏氏(九大、原子力機構)によって、「統合コードによる核燃焼シミュレーション研究～粒子・熱制御に向けた炉心・ダイバータ・境界層の統合化～」と題するトカマクプラズマにおける統合シミュレーション研究が報告された。この講演では、Burning Plasma Simulation Initiative (BPSI) と呼ばれる磁場閉じ込めプラズマの核燃焼シミュレーションに対する全日本的な取り組みの枠組みがまず紹介された。その後で、特に、SONIC と呼ばれる周辺領域に対する統合ダイバータコードの開発に焦点を当てた報告がなされた。この統合コードは、プラズマを流体として解くコード、中性粒子および不純物のそれぞれに対してモンテカルロ法で解くコードから構成されている。さらに、周辺領域でのプラズマの挙動に対しては、PICを用いたPARASOLコードによる運動論的効果の情報も取り入れられるようになっている。講演では、この統合コードによる数値計算結果とJT-60Uの実験結果との比較や、JT-60SA設計への応用が紹介された。この周辺領域のシミュレーションとコアプラズマシミュレ

ーションの統合化も現在進められているとのことである。

最後の講演は、加藤太治氏(核融合研)による「磁場核融合炉プラズマ対向壁と水素相互作用の原子過程とシミュレーション」と題する研究報告である。この講演は、トリチウムの炉内蓄積および排出評価のためには照射損傷を受けたプラズマ対向材料での滞留量を正確に評価する必要がある、という観点に基づいた研究成果の紹介である。その評価に必要なミクロ的現象解明のための手法として、量子力学的な密度汎関数理論に基づく第一原理分子動力的シミュレーションが用いられている。本講演では、対向壁材料として、特にタンゲステンが取り上げられ、金属表面における解離吸着、単原子空孔による水素の多重捕獲、原子空孔集合体の生成・成長に対する水素効果等に対する計算結果が紹介された。このようなミクロ的な構造変化の知見とマクロな水素吸蔵モデルの両者を含むマルチスケールシミュレーションの開発が今後の課題として指摘された。

(座長：核融合研 市口勝治)

8. シンポジウムⅣ「核融合炉工学の展開」

ITER 設計評価検討ワーキンググループ(WG)の活動について大阪大学の堀池より報告した。ITER計画の進展に伴い種々の設計変更が検討されている。特にSTAC事項と呼ばれる設計変更が重要なものとして検討され、それらの内容や検討と評価の結果について報告された。

ITER 超伝導マグネットの技術開発と調達の実況について、中嶋秀夫氏(原子力機構)より報告された。ITER計画では、日本はEUに次いで多い、本体機器の2割の調達を分担する。本体の約1/4を占める超伝導マグネットの調達では、Nb₃Sn 超伝導体やトロイダル磁場コイルなどの主要部分を分担する。ITERは18個のトロイダル磁場(TF)コイル、1組の中心ソレノイド(CS)、6個のポロイダル磁場(PF)コイルを有する。原子力機構では日本分担分であるTFコイル用超伝導体の25%、CS用超伝導体100%、さらにTFコイル巻線部を9個、TFコイル構造物を19個を製作する。超伝導材の製作状況とTFコイルの製作着手についての状況も紹介され、我国の機器製作が順調に滑り出したことを印象づけた。

ITER テストブランケットモジュール(TBM)試験計画と原型炉ブランケットについて秋場真人氏(原子力機構)より報告された。ITERは二つの大きなミッションを負っている。一つは核燃焼プラズマの実証であり、もう一つは核融合炉の実用化に必要な核工学要素機器の工学試験である。核工学要素機器の統合試験として、ITER参加各極は、独自のモジュール規模の原型炉用ブランケットを取りつけて機能試験を行う、テストブランケット・モジュール(TBM)試験計画を進めている。ITERにおけるTBM計画の各極の状況とポート取り合いについての紹介があり、我が国独自の方式である固体水方式によるTBM試験計画の研究開発と準備状況について報告された。

ブランケット構造材料開発の現状と課題-材料照射・システム統合研究-について木村晃彦氏(京大)より報告された。核融合向けの低放射化鉄鋼材料やODS鋼他の先端材料開発の紹介があり、それらを炉構造材として併用するた

めには、異材接合技術の研究開発が重要であること、接合・被覆部の照射影響調査が重要であることが説明された。また第一壁およびダイバータの製作では、W 被覆技術が不可欠であるが、W の難点は低い破壊靱性と、室温において全く塑性変形しない点である。W 被覆と支持構造材料との連結強度は、材料の環境とシステムの性能に基づき、熱疲労特性、スパッタ率および水素保持特性などとの相関を統合的に検討し、現実的かつ効果的な仕様にしておくことが肝要である。中性子耐性に優れ、延性の高い高性能 W の開発の必要性などについて述べられた。

トリチウム燃料サイクルの安全性と経済性について田辺哲朗氏（九大）から報告された。核融合炉では核融合プラズマの核燃焼を維持するために大量のトリチウムが燃料として中性粒子入射系、ペレット、ガスパフの装置を通して供給され、いったんプラズマ化され燃焼される。しかし大部分は燃焼せずに炉心から逃げ出して壁に蓄積されるか、プラズマ粒子と併せて排気される。核融合炉の燃料サイクルとして循環するトリチウムは、重さではわずか数kgであるが、放射能レベルでは100 PBq（ペタベクレル）に上り、安全規制値より10桁以上多い。このためITERではわずか100回のDT放電で、立地点での使用許可量を超えるトリチウムが真空容器内に蓄積され、トリチウムの除去作業が必要となる。循環量の多さより、定量評価の誤差を極めて小さくしなければならない。このように核融合の燃料サイクルは効率が悪く、炉心燃料の燃焼率も低いが、このようなシステムの計量管理にシステムは極めて困難な開発案件であることが説明された。（座長；阪大 堀池 寛）

9. シンポジウム V. 「原型炉に向けたプラズマモニタリングと制御」

本セッションは、連合講演会最後のセッションにも拘わらず、多くの参加者があり活発な議論が交わされた。各講演の要旨は下記のとおりである。

岡本 敦氏（東北大工）は、「炉心プラズマ計測と今後の課題」と題して、国際トカマク物理活動（ITPA）でのITERにおける最優先課題と、その解決に向けた取り組みを中心に講演された。この活動によって当初最優先課題であった課題のかなりのものがその解決に見通しが立ち、リストから外れてきている。燃焼プラズマ中のアルファ粒子の計測はこの例に該当する。これまでの協同トムソン散乱計測を用いた高エネルギー粒子の計測法の進展や、アルファ粒子荷電交換法の開発によりその計測に見通しがついてきた。その他、多くの課題がこれまでの活動によって一般課題となってきているが、真空容器内に設置される光学ミラーに関しては、最優先課題としての開発が継続されているとの紹介があった。日本における本活動には、平成16年からの特定領域研究「プラズマ燃焼のための先進計測（領域代表者：笹尾眞實子東北大教授）」が大きな貢献をしている。

河野康則氏（原子力機構）は、「原型炉に向けてプラズマモデリングに関する課題」と題して原型炉での計測の課題に関して講演された。原型炉での計測では、ITERの厳

しい実験環境下において運転が実証された計測器が候補となるが、これに加えて原型炉では、1年にわたる連続運転が要求され、さらに厳しい仕様が求められることになる。信頼性を高めるために、複数の検出端の使用によるバックアップの必要性や、現状では、実験開始前後に実施している較正を連続運転中にも適宜実施するための手法の開発など新たな課題に直面することなどの紹介があった。また、計測器によっては、連続運転中における保守・点検作業の必要性を強調された。さらに、原型炉でのモニタリングの考え方として、運転開始時の計測システムから原型炉最終的段階での経済性を考慮した発電実証期における最小な計測セットへ段階的に移行する考えが示された。

鎌田 裕氏（原子力機構）は、「原型炉に向けたプラズマ制御に関する課題」と題して講演された。核融合プラズマに要求される総合性能を獲得するには、プラズマの温度、密度、電流分布等のプラズマ諸量の分布をセットとして制御することが必要であり、これらの諸量はお互いにカップルしていることから、制御マトリックスの重要性を指摘した。また、対象とするプラズマは、自己加熱が主体であり、全加熱量の10%程度の外部加熱入力によって適切な分布に制御することは、これまで行われてきた制御からは飛躍したものとなる点を強調した。そのために、最低限の計測と制御機能によってどのように制御していくかは、ITER、JT-60SAの研究課題であり、そのための計測機器の開発にJT-60SAを活用してほしいと講演された。

（座長：核融合研 川端一男）

10. ポスター発表

*1A. 磁場閉じ込めプラズマ

磁場閉じ込めプラズマのカテゴリーでは62件の発表が行われた。このうちヘリカル系が34件（LHD：27件、ヘリオトロンJ：6件、東北大ヘリアック：1件）と大多数を占めた。LHDからは高密度プラズマ研究、MHD、高エネルギー粒子、不純物輸送等、多岐にわたる最新の研究成果が報告された。ヘリオトロンJでは、AEモードに関する実験や計測機器に関する話題、超音速分子ビーム入射実験に関する発表があった。東北大ヘリアックでは、閉じ込め改善を目的としたバイアス実験を進めているが、今回は $m=3$ 磁気島を外部摂動コイルにより印加し、改善が起きる時の磁気島幅とバイアス電流との関係について発表がなされた。大型トカマク装置であるJT-60Uはすでにシャットダウンしたこともあり、実験結果の発表がディスラプション研究とダイバータ部の揺動解析の2件にとどまった。名大のトカマク・ヘリカルハイブリッド装置であるTOKASTAR実験に関する研究発表が5件あり、装置概念から平衡解析、データ収集系から最新の実験結果など一連の発表が行われた。高ベータプラズマ生成が大きな特徴であるFRCに関する発表は4件、RFPが2件あった。RFPでは、近年発見された閉じ込め改善モード（準単一ヘリシティ配位など）および改善をもたらすパルスポロイダル電流駆動法を用いた場合のパラメータ領域に対する報告があった。STに関しては、九大のQUEST、東大のTST-2、UTST、兵庫県立大の

HISTにおける最新の研究成果について報告がなされた。他にもダイバータ物理に関する実験研究、乱流輸送に関するシミュレーション等に関する発表がなされ、大学院生および若手研究者を中心に熱い議論が行われた。

本カテゴリーからは2件の発表が若手優秀発表賞として選出された。1件は大石鉄太郎氏(名大)の「DT核融合炉へのトリチウム燃料供給シナリオの最適化シミュレーション」である。統合シミュレーションコードTOTALを用いた炉心解析において、ペレット内D/T比を制御パラメータとして選択し、トリチウム供給量を低減できる可能性が明確に示されている点が炉設計の観点から重要な提案であると評価された。もう1件はJyoti Shanker Mishra(総研大)氏の「Stereoscopic observation of pellet ablation in LHD」である。LHDにおけるペレットの溶発過程をイメージングカメラで観測し、中性粒子ビーム加熱方向と溶発ペレットの軌道や速度の関係を明確に示した。測定結果について定性的に予測されるものと良い一致が得られていること、また、ポスターの内容、説明が明確であったことが受賞理由である。(核融合研 榊原 悟)

* 3C: プラズマ診断

プラズマ診断のセッションでは2日に分けて合計21件の発表があった。内訳は、二波長干渉計2、燃料イオン比計測1、アルファ粒子計測2、中性子計測6、熱流速計測1、分光法による密度計測2、磁気面再構成法2、トムソン散乱計測4、ミラーの光学特性劣化1であり、12件の若手の発表中2件が若手優秀賞を受賞した。

今回の連合講演会の発表は、アルファ粒子や中性子計測など核融合炉条件に近いプラズマパラメータを想定した次期装置やITERへの適用を考えた計測器開発に関わるものが大多数であったことが特徴である。

主な内容は、100ミクロン帯の二波長レーザー干渉法の素子を含めた実用化研究の進展が示された。GAMやTAE等の密度揺動計測によってD/T燃料比を出す新たな提案がなされた。アルファ線の計測に関しては、損失アルファ粒子と壁の核反応で発生するガンマ線を計測する検出器にとって雑音となる中性子の感度減少や、遮蔽に関する検討がなされた。また、中性子とガンマ線が混在するJT-60の

データから両者を弁別するアルゴリズムの開発、閉じ込められたアルファ粒子を高速ビームプローブ法で計測する手段として必要な1-2 MeVのヘリウム高速中性粒子源の開発状況が紹介された。DD反応によって生じる高速中性子のエネルギースペクトルを観測するための検出器、エネルギースペクトルに対して平坦な特性をもつ中性子モニタ、中性子イメージング計測手法の開発、また、レーザー核融合に要求される耐高エネルギーX線の中性子スペクトロメータの開発など、中性子の検出器に関する検討や開発も次世代計測開発として注目された。また、計測装置にとって核融合炉で大きな問題となる光学ミラーの劣化特性に関して、重水素とヘリウムビームを同時照射したMoミラーの特性変化の測定が報告され、多くの聴衆の関心を集めていた。

この他、既存計測器の改良として、熱流速モニタの開発、リチウムビーム源の開発とそれを用いた電子密度分布計測、分光的原子密度評価手法の開発、QUESTにおける実時間磁気面再構成法の開発、新たなトムソン散乱計測器の設計検討としてマルチパストムソン散乱計測、JT-60SAやヘリオトロンJのトムソン散乱設計検討が紹介された。また、新たな試みとしてLHDで行われたジャイロトロンを用いた協同トムソン散乱の結果も報告された。

(核融合研 久保 伸)

* 4D: 加熱・電流駆動

加熱・電流駆動には12件の発表があった。大別して、EC(電子サイクロトロン波)4件、IC(イオンサイクロトロン波)2件、NB(中性粒子ビーム)5件、その他1件で、そのうちの2件が若手優秀賞が選定された(小島, 中野)。まず、LHDのECHシステムでは、77 GHz ジャイロトロンで1.5 MW、1秒出力が達成される等、近年大電力化、高効率化が進んでいる。また、伝送系内のミリ波ビームの実時間位置検出法の開発結果も併せて報告された(下妻)。JAEAでは、ジャイロトロン出力と伝送系との結合実験を行い、世界で初めてITERで要求される95%の伝送モード(HE11モード)との結合に成功した(小田)。QUESTでは電子バーンシュタイン波による加熱電流駆動実験が始まり、そのO-X-Bモード変換を含むray-tracingの結果が発表された



(Kakinnikova). IC では、最近 LHD に装着された新しい hand-shake 型 IC アンテナの設計結果と、加熱実験において期待されるオペレーションパラメータの拡大について報告された(笠原). 東大の UTST 球状トカマクにおいて、磁気プローブを用いた 21 MHz 高次高調速波の直接測定の結果が報告された(若月). NB では、NIFS より負イオン源のプラズマ電極近傍の特性を調べた結果が報告された. セシウムスペクトル強度と負イオン電流の相関(池田), 実時間でのアーク電力と負イオン密度の相関, ビーム引き出し時の負イオン密度の低下等のデータ(中野), プローブを用いた電極近傍の負イオン密度と電子密度の相関, 電位形成, 粒子バランス等の議論がなされた(津守). また, JAEA から静電加速器の耐電圧向上の研究成果として, 耐電圧に与える加速電極の面積効果に加え, 加速電極に開けられたビーム透過用電極孔の耐電圧に対する影響が指摘された(小島). アルファ粒子計測用ヘリウム正イオン源の研究として, 多孔型における各ビームレットの相互作用によるエミッタンスへの影響が報告された(木崎).

(原子力機構 坂本慶司)

* 5E: 炉システム設計・超伝導マグネット・第一壁など

全26件が発表され, 内8件が若手発表であった. 炉システム設計に関しては, ヘリカル炉 FFHR のシリーズ講演があった. FFHR 概念最適化に向けた設計統合とデモ炉へ向けた推進方策に続き, 炉心プラズマ設計に関しては, イグニッション領域の閉じ込め増倍度依存性, 設計尤度システム解析, 薄型ヘリカルコイルによる FFHR 磁場配位の検討結果が発表された. さらに, 炉工学設計に関してはダイバータスイープ用コイル, 間接冷却型コイル, 超伝導コイル保護システム, トリチウム回収システム設計に関する検討結果が発表された. その他, トカマク型原型炉 Slim-CS におけるダイバータ解析, ST 核融合炉概念検討, バイオマスハイブリッド核融合炉 GNOME の概念設計, TITAN での MFE/IFE システム統合モデリング, ITER 遠隔保守ロボットの開発, 原型炉用水冷却ブランケットの最適化, LiPb ブランケットのトリチウム回収装置の設計と, 炉システムに関する幅広い分野の研究結果が発表された.

超伝導マグネットに関して, ITER 用 TF コイルの日本に

おける作製状況について説明があった. JT-60SA の超伝導に関しては, NIFS 超伝導体試験装置での性能評価試験について発表があった. その他, 超伝導材料の中性子照射効果やビリアル限界コイルの応力解析が発表された.

第一壁に関しては, ITER ダイバータ外側ターゲットの開発に関して 1/2 規模のプロトタイプ技術開発状況の発表があった. その他, タングステン表面における反射特性, タングステン表面のヘリウム損傷に及ぼす温度履歴効果, タングステン中の同位体滞留と照射損傷の影響の検討が発表された.

なお本セッションから, 押尾純也氏(静岡大)による「核融合炉環境下においてボロン膜中に捕捉された水素同位体の滞留挙動に関する研究」が若手優秀発表賞に選出された. (電中研 日渡良爾)

* 6F: 炉材料

本セッションでの発表を大きく分類すると, 材料としては, 第一壁, ダイバータなどプラズマ対向材関連と低放射化構造材, および ITER 用材料に分けられ, 研究課題としては, 被覆, 接合を含む材料の製作評価, プラズマ・壁相互作用試験, 照射実験, 腐食試験, 微小試験片技術, モデリングに分類される.

プラズマ対向材関連では, 発表16件のうち10件がタングステン中心, 3件がタングステンを含む複数の材料を比較したもの, ほかに炭素系材料, 低放射化フェライト鋼の試験が報告された. LHD, QUEST, 各種模擬試験装置等を用いた対向材試験, 長時間リサイクリング, ELM, ダストや混合堆積層の形成, ヘリウム照射を模擬する試験が行われ, 表面構造・組成, 損耗・堆積, リテンション, ミラーとしての特性などが調べられた. また, 核変換効果の研究, ボイド形成のモデリング, 国際協力による Be を含む混合プラズマ, トリチウムプラズマ試験が報告された. タングステンに関する知識が急速に深まりつつあることが実感されるが, 一方, 試料の準備はそれぞれ独自に行われているのが現状であり, 標準材料の確立が急務である.

低放射化材料では, 低放射化フェライト鋼, 酸化物分散強化 (ODS) 鋼, バナジウム合金, SiC 複合材料の成果が報告された. 特に低放射化フェライト鋼は, ITER 幅広いアプローチ活動の共同研究成果が注目される. また, 異種接合を含む接合研究, 耐熱, 防食等を目的とした被覆研究が



進められている。全体として、ブランケットの製作を強く意識した技術開発が進みつつある。一方照射効果に関しては、応力効果など新しい研究も報告されたが、原子炉の停止の影響が全体に低調であり、製作技術の進展と合わせた照射データ整備の必要性を強く感じた。また、微小試験片技術に関しては、計測法や解析法の進歩により新しい展開を探る研究が見られ、今後の発展が期待される。

(核融合研 室賀健夫)

* 91: 理論シミュレーション

本セッションでは、25件の発表が行われた。その内訳は、トカマク11件、ヘリカル6件、基礎4件、レーザー核融合2件、核融合炉2件であり、トラス・プラズマを中心として、幅広い領域のプラズマについて理論・シミュレーションによる研究成果が発表された。また、若手研究者の発表件数は14件と半数以上が若手による発表であり、彼らを中心に活気ある討論が行われた。

トラス・プラズマにおける輸送シミュレーションでは、ポロイダル角依存性を考慮した2次元コードの開発、多流体コードにおける新古典輸送の取り扱いに関する検証、径方向輸送を考慮したフォッカープランク方程式を解く運動論的コードの開発などこれまでの輸送シミュレーションを拡張する新たなモデリングとその結果について報告が行われた。また、線形MHD不安定性が存在する場合の限界 β 値を求める輸送シミュレーションのモデル化行われた。その他、モンテカルロ δf 法による新古典電子輸送の他コードとのベンチマーク結果や乱れた磁場中のイオン熱輸送に関する報告が行われた。

MHDについては、周期的外部磁場揺動が存在する場合の磁気島発生について解析が行われ、周期的外部磁場とNTM等における種磁気島発生の因果関係を説明する新しい理論モデルが示された。また、静的磁気島と交換型モードとの相互作用について解析が行われ、ベクトルポテンシャルで記述したMHD方程式系を用いた計算コードの開発が進められた。

ダイバータ関連では、ITERにおける不純物モニタの開発やDemo炉における不純物入射と形状効果によるダイバータ板への熱負荷低減に関する解析が行われた。また、不純物に関しては、ELM時の原子・分子過程を含むモデリングや熱力を運動論的なモデルを用いて正確に再現・評価出来る数値計算手法の開発について報告が行われた。二体衝突近似モデルと分子動力学法を連結したコードの開発が進められた。

プラズマ加熱関連では、ICRF加熱によるトロイダル流発生機構の解明や高エネルギーテイルイオンと波動伝播との自己無撞着な解析が行われた。NBI加熱におけるビーム粒子の磁気面外に損失した粒子の再突入の効果に関する報告が行われた。JT-60SAにおけるECRHによる着火に必要な

加熱パワーなどについて検討が行われた。

発電実証炉や商用炉の性能評価を高度なものとするため、統合設計コードのプラットフォームの開発が行われた。磁場核融合炉と慣性核融合炉の性能比較として、経済性と環境負荷について評価が行われた。

レーザー核融合プラズマ関連では、縮退プラズマにおける新たな阻止能モデルを導入した輸送研究やレーザー光源のアルファ粒子に対する保護に関する研究成果が報告された。

また、多階層モデルを用いて、重要な基礎プラズマ過程である磁気リコネクションについて、シミュレーションが行われ、PICとMHDの領域がなめらかに繋がるなど、スムーズな連結が得られた。(京大 村上定義)

11. スーパーカミオカンデ見学ツアー

超新星爆発で生じるニュートリノ検出に成功し、ノーベル物理学賞を育んだカミオカンデ。本講演会では、高山での開催を機会に、カミオカンデの約11倍もの個数の高電子増倍管を有するスーパーカミオカンデ・未知の物質ダークマターを検出しようという挑戦的な装置であるXMASS(エクスマス)を見学しました。参加者45名が晴天の高山駅をバスで出発し、施設のある神岡鉱山まで1時間半といった長旅でしたが、ニュートリノ検出がどんな状態で行われているかに期待を膨らませながら坑道を奥へと進み、施設を見学しました。現在は実験中であるため、高電子増倍管が設置されているスーパーカミオカンデ内を見ることはできませんでしたが、制御室ではリアルタイムで検出されるチェレンコフ光についての説明をうかがいました。予想される環状のチェレンコフ光が検出された時には、参加者はみな目を輝かせて歓声をあげていました(図1)。

多忙な研究スケジュールの中、我々のために時間を割いて丁寧な説明をしてくださった鈴木洋一郎教授と中畑雅行教授に、この場をかりて厚く御礼申し上げます。

(核融合研 笠原寛史)

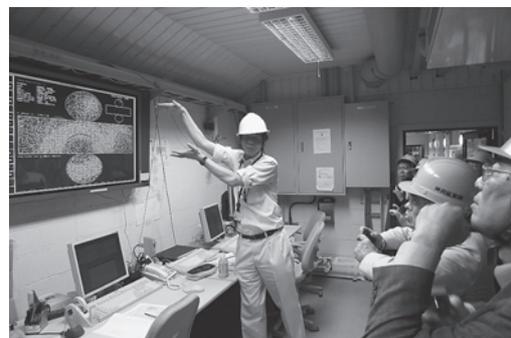


図1 スーパーカミオカンデの高電子増倍管が捉えたチェレンコフ光(左)、写真左手の大型ディスプレイに次々とニュートリノが超純水中を通過するときに生じるチェレンコフ光が表示されている。