



## 本会記事

### ■第7回核融合エネルギー連合講演会—核融合は地球を救えるか— 報告

1995(平成7)年以来隔年開催され第7回目となる核融合エネルギー連合講演会は、実験炉ITERを補完する「幅広いアプローチ(ITER-BA)」実施サイトの一つ青森県六ヶ所村にほど近い青森市で、2008(平成20)年6月19日(木)–21日(土)の3日間、青森市民ホールおよびアウガ5F青森市男女共同参画プラザ AV多機能ホールを会場として開催された。本講演会は当学会が(社)日本原子力学会と共同主催するもので、炉心プラズマ・炉工学を始めとする広範な関連研究分野の成果を検証し、併せて今後の研究の進め方、基礎科学への寄与、技術的波及などに関しても幅広く議論を展開する貴重な機会として、我が国の核融合研究の進展に重要な役割を果たしてきた。前回の開催以降この2年間には、我が国の核融合研究開発を取り巻く状況に一つの大きな変化が生じており、建設サイトが仏国カダラッシュに決定された実験炉ITERに関連して、2007年春にITERを補強補完して原型炉への道をより確かなものとする「幅広いアプローチ」活動が日欧間で合意された。一方、エネルギー問題と強く関連する地球環境問題は、気象や生態系の激変が実感として意識されまでになり、エネルギー資源の枯渇の懸念も予想されるなど、近代文明の行く手に少なからぬ不安の影が見え隠れするようになってきた。制御された核融合エネルギーを実現するという研究者の使命は、文明的な意味でその重要性を増したとあって過言ではなく、そのような状況の中、「核融合は地球を救えるか」という主題が示すように、学術研究に留まらない人類・社会への貢献について研究者自らが問い応える場として重いテーマを設定し、今回の連合講演会が企画された。

このような趣旨で開催された講演会に関わる各種実績の数字は次のとおりである。参加者総数358名(会員一般253名、学生105名)、ポスター講演総数約280件。また今回は、前回に比べ会期を1日増やして3日とし、二日目の午後をテクニカルツアーにあてた。視察場所は、六ヶ所村内にあるITER-BAサイトおよび日本原燃(株)再処理関連施設とした。さらに同じ時間帯に高校生を会場に招いての霧箱実験授業と高校に出向いての出張授業を企画実施した。ツアー参加人数は128名、参加高校生の数は、五所川原、八戸、弘前工業の3高校合計で約140名となり、関心の高さが数字となって現れた。

本講演会では会期中を通して、招待講演、パネルディスカッション、特別講演、6つのシンポジウム講演を2会場で並行開催し、それぞれ時宜を得た最新の話題、研究課題について専門家による講演と活発な質疑が展開された。またポスター講演では、12カテゴリーそれぞれで発表者と参加者との熱心な討論が行われ会場は熱気で満たされた。その中から専門家の厳正な審査を経て特に優秀と認められた9名の方々に優秀発表賞(氏名は後述)が贈られている。

以下に、各セッション、シンポジウム、ポスター講演の座長あるいはテーマ分野の専門家による概要報告を記載する。

プログラム委員会 栗原研一(原子力機構)

### 1. 開 会

開会にあたり、主催者を代表して、本連合講演会組織委員長の清水昭比古教授(九大)から挨拶が行われた。そこでは、日本原子力学会とプラズマ・核融合学会の共催による連合講演会が我が国の核融合研究開発に果たしてきた大きな役割や、我が国における核エネルギー利用の歴史を振り返りつつ、今現在世界が直面する環境・エネルギー問題の解決に立ち向かうのは我々世代の責務であり、核燃料サイクルの確立と核融合開発は将来を左右する大きな課題であるとの認識が述べられた。さらに、ITER計画や幅広いアプローチ活動が開始され、洞爺湖サミットを直前に控えたこの時期に、核燃料サイクルの確立と核融合開発のベースである青森で連合講演会を開催することは極めて意義高いことであり、基調テーマである「核融合は地球を救えるか」との問いかけに対し、熱い議論が展開されることを切望するとの期待が述べられた。

引き続き、来賓を代表して青森県の三村申吾知事からご挨拶を賜った。青森で本連合講演会が開催されることへの歓迎の意が表され、引き続き、平和の基礎は、食料、水、資源、エネルギーであり、とりわけエネルギーの安定供給が第一であること、青森は食料、水が豊かであり、エネルギーに関しても、核燃料サイクルや核融合など、国の施策を通して世界に大きな貢献を行っていることが述べられた。地球規模の環境・エネルギー問題には、各国、各世代、各界が着実に責務を果たしていく必要があるが、その中で核融合は大きな役割を果たすことが期待されており、青森出身のプロ・スキーヤー三浦雄一郎氏が先日75才の高齢でチョモランマ登山に成功したように、是非青森をベースキャンプ地として、核融合の実現にチャレンジしてほしいとの期待が述べられた。

高津英幸(原子力機構)

### 2. 招待講演、パネルディスカッション、特別講演

#### 2.1 招待講演「核融合は地球を救えるか?」第1部

最初にITER機構長の池田 要氏より「建設段階に入ったITER」と題して、ITER国際機関の立ち上げの状況が詳しく紹介された。ITER計画の事業範囲、スケジュール、装置技術仕様などの概要説明の後、とくにITER建設地のサイト整備の状況、ITER機構の組織の立ち上げ状況、各極との調達取り決めの進捗状況などを臨場感あふれる形で紹介されるとともに、ITERは若い人たちが活躍できる国際的な場であり、日本からの参加が強く求められていることを強調された。

次に文部科学省研究開発局の松尾泰樹戦略官から「ITER、BAを始めとする我が国の核融合研究の現状」と題して、環境・エネルギー問題の現状をレビューされた後、わが国はこの問題に貢献するため先進的エネルギー研究開発として核融合研究開発を位置付けていることが紹介された。そして世界の核融合研究の進展、日本の核融合研究の広がりを概観し、原子力委員会による第3段階計画、文科省審議会での重点化や連携協力などの施策を背景としつつ、その上に立ってITER計画に積極的に参加してきたこと、日欧で幅広いアプローチ計画が進められていることを紹介し、最後

に今後重点的に取り組まなければならない課題として人材育成があることを紹介された。 松田慎三郎（原子力機構）

## 2.2 招待講演「核融合は地球を救えるか？」第2部

本セッションは、エネルギーと社会、環境の視点からの3件の招待講演をいただき、第1部の核融合研究プログラムの内側からの話と対をなして、この連合講演会の主唱テーマ「核融合は地球を救えるか？」を考えることを目的としたものである。

英国カラム科学センター所長、欧州核融合諮問会議(CCEFUFU)議長のSir Chiris Llewelly Smith氏の講演は、"Energy, Sustainability and Development"と題して、現在の人類社会が直面する持続可能性の問題を、エネルギーと地球環境の観点からわかりやすく、かつ効果的に最新のデータを踏まえて概観したものである。発展途上国の経済開発、エネルギー資源、地球温暖化、の問題に対する分析と、それに対する再生可能エネルギー、炭素隔離(CCS)、原子力、そして核融合の技術の特性と可能性の評価が、統合的に描かれた。この問題に対する最新の知見、世界の動向を鋭い切り口で見せる一方、大局的、歴史的な洞察による透徹した世界観が伺える格調高い講演であった。

立命館大学の佐和隆光教授は、わが国を代表する著名な経済学者であり、「低炭素社会2050：革新的技術の役割」と題して、気候変動問題に対するわが国および世界の社会的、経済的取り組みを解説された。特に、社会の低炭素化に向けた取り組みと各国や経済界の対応の生々しい現実がわかりやすい事例によって説明され、地球環境問題が、いまや世界の政治経済を動かす大きな軸となっていることが理解される。この問題は日々刻々大きく変化する社会のただ中にあり、わが国も洞爺湖サミットに向けて、明確に低炭素化に向けた舵を切っていること、国際政治の中できわめて難しい局面にあることが明らかにされた。

東京大学の田中 知教授からは、「核融合はサステナブルなエネルギー源たりうるか—軽水炉、高速増殖炉との比較—」というテーマで、特に原子力政策、核エネルギー研究開発全体の中での核融合のとりうる役割が分析された。わが国の原子力政策は地球温暖化対策としての原子力エネルギーの平和利用の世界的拡大をめざし、高速炉と核燃料サイクルの確立を進めている。これに対し、核融合研究者の認識は十分でないことが指摘され、核分裂研究者との協働による全日本的な取り組み、広い核エネルギー開発の戦略の中での位置づけとエネルギーとしての技術的実証の重要性が強調された。 小西哲之（京大）

## 2.3 パネルディスカッション「核融合は地球を救えるか？」

このパネルディスカッションは、招待講演による、核融合に期待される役割と研究開発の現状と計画を踏まえ、主唱テーマ「核融合は地球を救えるか？」の回答を見出すことを目的としたものである。パネリストには、蝦名武青森副知事、池田要ITER機構長、松尾泰樹研究開発戦略官、佐和隆光立命館大学教授、田中知東京大学大学院教授、松田慎三郎日本原子力研究開発機構執行役を迎え、座長を京都大学の小西がとめた。

座長の、①地球環境問題の捉え方、②わが国と世界の長期的エネルギー供給、③革新的エネルギーの役割、の視点を軸に核融合を検討する、という趣旨説明に続き、松田氏より、核融合のロードマップとして、2030年代に発電実証、2050年代の市場投入の開発

戦略が示された。これに対し各パネリストにより示されたコメントは多岐にわたり、また示唆に富むもので、要約しきれないがいくつかのポイントのみを示す。佐和氏からは、最新のエネルギー技術の見通しが環境政策に反映されていない現実が指摘された。松尾氏は、核融合研究がエネルギーとしての高い戦略性を示す必要性を示唆した。田中氏は、核融合が核分裂と協働すべきことを強調した。蝦名氏は核融合研究開発の社会、地方との協調の必要性と期待を示した。松田氏は、核融合研究開発のロジカルな戦略構築の必要性を指摘した。池田氏は国際協力で社会に向き合う現場にあって、核融合研究者の社会認識の甘さに注意を促した。パネリスト同士の討論、フロアとの質疑の後、最後に座長より「核融合が地球を救わなければならないこと、そのメッセージを研究者自身が出すべきこと」がまとめられた。

きわめて高いレベルの、異分野のパネリストが一同に会し、核融合について語っていただける稀有な機会として、有意義なパネルであったといえよう。特にパネリストのご配慮で、ともすれば発散しそうな話題が、核融合と社会の関係に留意したかみ合った議論になったが、それに対する核融合研究者側の理解と対応は如何であったろうか。核融合側からの、「具体的に地球を救えること、その手段」についての回答、特にフロアからの若手の意見がないことは残念であった。池田機構長に叱咤されたように、残念ながらまだ社会に対する研究者の意識は十分高くない。核融合の潜在的可能性と期待に対し、具体案が示せなかった分、決意の表明で終わったのはせめてもの救いといっは言いすぎであろうか。

小西哲之（京大）

## 2.4 特別講演「核融合は地球を救えるか？」第3部「戦略と展望」

核融合は地球を救えるか？というテーマで行われた講演の第3部として、このセッションでは2件の特別講演が行われた。まず、本島 修氏（核融合研）から「核融合研究の基盤」と題しての講演があった。概要は以下のとおり。

核融合開発における基盤研究の重要性とその方向性について、紀元前5世紀のギリシアの歴史家ヘロドトスの言葉「エジプトでは医術が次のように専門別に分化している。それぞれの医者は一種の病気のみを扱い・・・中略・・・そして全体を診断する医者はいない。」を引用し、学問の体系化によって分割された各分野を統合し、全体が見渡せるようになっていることが重要であることが説かれた。そのような幅広い研究基盤を確立していく過程で注意すべきことは、すべての研究者を同じスタートラインに立たせるのではなく、得意なこと、独創性があることに集中できる環境を作ることである。今後、核融合のような大型のサイエンスを進めていくに当たっては、1)大学法人化に適合する意思決定の仕組み、2)学術と開発の在りかたについての評価と戦略、3)ロバストトリダグナンシーを併せ持つ2極構造、4)ビッグサイエンスの中にも小規模の萌芽、5)独創的アイデアを長期にわたり育てられる体制、6)コミュニティの意思決定の仕組み、といったものがぜひとも必要になってくる。

引き続き、奥村義和氏（原子力機構）より、「ITER・BAへの取り組み」と題して、これらの計画の全日本的な実施体制やその進捗状況が報告された。概要は次のとおり。

幅広いアプローチ(BA)計画については、2007年6月にEUとの協定が発効し、2008年5月21日には六ヶ所サイトの工事着工

に至っている。ITER 計画は、2007年10月24日の ITER 協定発効以降、2回の ITER 理事会が開催され、事業明細や全体スケジュールが承認されている。BA 計画は、サテライトトカマクと計算機シミュレーションにより、ITERにおける試験研究を効果的・効率的に行うとともに、原型炉設計や原型炉に向けた研究開発を行い、将来の原型炉への礎を築こうとするもので、以下の3つの事業からなる。1) 国際核融合材料照射施設の工学実証・工学設計活動 (IFMIF/EVEDA), 2) 国際核融合エネルギーセンター (IFERC), 3) サテライトトカマク装置 (JT-60SA)。このうち、3) は那珂サイトに、その他は六ヶ所サイトにおかれる。今後は、ITER 計画を支援しつつ、原型炉への先駆的な研究開発を行う予定である。

岡野邦彦 (電中研)

### 3. シンポジウム講演

#### 3.1 シンポジウム I 「DEMO に向けた炉工学の展望」

本シンポジウム講演では、ITERに向けて技術開発が進められている5つの炉工学分野における開発の現状と課題をまとめ、そこから次の段階である DEMO 炉を実現するのに必要な炉工学の技術的な課題と展望について講演と質疑が行われた。

最初の講演は、今川信作氏 (核融合研) により「超伝導マグネット・DEMO に向けた課題」と題して行われた。現在製作が進められている ITER の TF コイルはマグネットの蓄積エネルギーでこれまでの核融合実験装置の50倍の規模であり、DEMO はさらにその2倍以上の規模であることから、ITER は DEMO のマグネットの成立性を見通す上で重要な前段階であることが報告された。さらに DEMO に向けた重要な開発課題として超伝導線材と導体の開発、耐力の高い構造材料、耐放射線性の絶縁材料があげられ、実用化に向けた議論が行われた。

2 番目の講演は、井上多加志氏 (原子力機構) により「加熱装置・ITER から DEMO へ、工学の展望」と題して行われた。DEMO の加熱装置の要求として、H モード遷移のための加熱装置、長時間燃焼のための非誘導プラズマ電流駆動、ECH と NBI の装置開発のレビューがあった。中でも ECH 用ジャイロトロンの開発では ITER の要求性能以上のものが開発済みであること、NBI においては電流値の増大が課題であること、実機試験施設の建設による実証が計画中であることが紹介された。DEMO に向けては NBI の定常運転への取り組みが課題であり、さらに装置の耐久性などについて議論があった。

3 番目の講演は、榎枝幹男氏 (原子力機構) により「DEMO へ向けたブランケット工学の現状と展望」と題して行われた。ITER におけるテストブランケットモジュール (TBM) の製作と照射試験により、実機サイズのブランケットを製作、トリチウムの生成・回収などのプロセスの検証、構造材料の照射データや、DEMO 炉における増殖・発電ブランケット選定のための基礎データをとることにより、DEMO 炉において最適なブランケットの全体構造の検証を ITER で行うことが報告された。また日本の計画として固体増殖・水冷却システムについて紹介され、ITER 後期では、TBM を使って発電実証を行う計画があることが紹介された。

4 番目の講演は、松山政夫氏 (富山大) により「トリチウム安全取り扱い技術の現状と開発課題」と題して行われた。ITER および DEMO の D-T 核融合炉の設置と運転においてはトリチウムの安全閉じ込め、安全取り扱いの2つが課題となっていること、ITER

の Puls 運転に対応して必要とされるトリチウム取り扱い技術が現在構築されつつあるが、DEMO 炉では長時間の連続運転が基本となることから、連続運転に対応した回収プロセスの確立の必要性が述べられた。特に元素状トリチウムの透過抑制技術や効率的回収技術による閉じ込めの高度化と、高濃度トリチウム水からの元素状トリチウムの回収技術の確立の重要性について議論された。

最後の講演は、室賀健夫氏 (核融合研) により「IFMIF を軸とした炉材料開発の展望」と題して行われた。国際核融合材料照射施設 (IFMIF) の工学実証・工学設計活動 (EVEDA) における材料研究の方向と課題と将来展望について紹介された。IFMIF の照射試験ではさまざまな制約があることから、IFMIF の結果のみで将来の DEMO 炉の材料の確証試験ができるわけではないこと、IFMIF のデータをどのように生かして DEMO 炉の候補材料を絞り込むかについての課題や検討項目がまとめられた。また DEMO 炉用の材料開発においては、いずれの候補材料においても日本に技術的優位性があること、この優位性を生かして IFMIF における照射試験を日本がどのようにリードしていくかの戦略の重要性が議論された。

長谷川 晃 (東北大)

#### 3.2 シンポジウム II 「ITER と大型装置」

本シンポジウムは、ITER および国内の大型実験装置 (JT-60, LHD, FIREX) について、それらの研究目的と現状を俯瞰し、核融合研究としての共通的な課題は何か、各プロジェクトの特徴・ユニークさはどこにあるのかを議論するために開催された。

核融合研究においては、十分大きな実験装置を用いて、核融合炉心条件にできるだけ近いパラメータ領域で実験を行うことが第一の重要性をもつ。このことは、核融合研究の黎明期 (1960年代) において既に十分認識されたことであるが、プラズマ物理学の進歩によって、その科学的な根拠が明確になってきた。すなわち、プラズマは「非線形」、「非平衡」、「多階層」という特徴をもち、諸パラメータの違いによって著しく異なる構造が現出するのだが、それらを理解するキーワードとして「自律性」ということがクローズアップされてきた。もちろん、核融合炉心プラズマは孤立系ではないから、完全に「自律的 (autonomous)」ではない。しかし、外的な条件に対する「応答」は、内的な状態の連鎖的な変化を伴う複雑なものであり、システム論的にいうならば、系内の膨大な自由度が多数の帰還ループで結合した高次の準安定システムである。その絡みあった過程の一つ一つの原理と相互関係、協働現象の現れ方が次第に明らかになってきたのだ。そして、「地上の太陽」という未だ宇宙に存在しない系が、どのように自律するのかを実験できる条件に、私たちは今まさに近づこうとしているのである。この段階においては、ITER というトカマクを用いた実験は、単に一つの炉形式の試験という以上に、核燃焼によって自律するプラズマの基本的特性を見極めるといって、核融合研究にとって一般的な意義をもつものとなる。そして、ヘリカルや慣性核融合など、トカマクとは異なる炉形式をめざす研究は、より実用的な次元において特長を競う時代に入ろうとしている。

こうした観点から、本シンポジウムでは以下4つの講演の後、会場からの発言も加わって活発な議論が交わされた。4 講演は、森 雅博氏 (原子力機構) 「ITER 計画の状況と ITER 日本国内機関の取り組み」、鎌田 裕氏 (原子力機構) 「ITER へ向けた JT-60の

研究開発」, 山田弘司氏 (核融合研)「ヘリカル方式による核融合科学の構築」, 疇地 宏氏 (阪大)「レーザー核融合: 高速点火実証実験 FIERX の進展」である。 吉田善章 (東大)

### 3.3 シンポジウムⅢ「磁気リコネクション研究における核融合と宇宙科学の連携」

磁気リコネクション研究は, 2000年前後に太陽観測, 磁気圏・宇宙観測, 室内実験, 理論・シミュレーションの協力体制が国内外で整い, 毎年MR国際会議を開催される等, 宇宙-核融合プラズマの分野間連携の先駆けとなってきた。シンポジウムでは, 同研究の主要4分野である太陽観測(原 弘久氏, 国立天文台), 地球磁気圏観測(町田 忍氏, 京大), 室内プラズマ実験(小野, 東大), 理論・シミュレーション(堀内利得氏, 核融合研)の観点から最新研究をレビューした。

2次元遠距離観測を特徴とする太陽観測は2006年ひので衛星の運用開始により, 解像度が格段に向上したX線画像や磁場画像(光球表面), ドップラー計測画像を手に入れ, 完全電離のコロナから弱電離の彩層に至る同時計測が, 無数のジェット=リコネクションに満ちた太陽の姿を明らかにした。コロナ加熱問題はリコネクションに加え, 光球に見つかった水平磁場やアルヴェン波によるエネルギー輸送のシナリオも実証されつつある。局所の直接観測を特徴とする地球磁気圏観測は, 複数個の衛星の同時運用: Cluster計画により, 不得手であった空間分布計測を大幅に拡充した。四重極磁場などホール効果に代表されるイオンスケールの現象解明には大きな進歩があり, 時間変化と空間変化を分離・統計処理しながら物理に迫る手法が確立した。SCOPE, X-Scale計画の紹介を通じ, 今後の電子スケールの解明へ向かう方向性が示された。

2次元直接計測が自由に行える室内(核融合)プラズマ実験は1990年頃のプラズマ合体実験の登場を契機に急拡大した。最近, 下流のイオン加熱, 電流シートの電子加熱から構成されるリコネクション加熱の解明, さらに低拡散の電流シートを過大なインフローで駆動する時に発生する粒子パイルアップやその先のプラズモイド放出=間欠リコネクションへの移行の発見などの多様な進展がある。

仮定の中ですべての物理が検証可能な理論・シミュレーションは, 異常抵抗の根源となるプラズマ不安定を解明した。その本質が慣性長ではなく, 有限粒子軌道効果であることを明らかにし, 長年の論争に決着をつけつつある。先駆的な開放系粒子シミュレーションにより間欠リコネクションの解明が可能となり, 今後はマイクロとマクロの2つのスケールを同時に解く階層連結シミュレーションに進化しつつある。最後に連携研究により宇宙起源のアイデアが核融合研究にフィードバックされることも大切である。リコネクション加熱は容易にMWクラスに達し, 超高ベータ球状トカマクやFRCの合体生成に結びつき, 連携研究は双方向に波及する時代になりつつある。 小野 靖 (東大)

### 3.4 シンポジウムⅣ「若手セッション: DEMO世代からみた原型炉開発課題」

このセッションの講演と議論では, ITER建設期に入って, 国内核融合研究が原型炉に向けた研究に大きく舵を切ったことが示されたとともに, 原型炉開発においては, 炉心プラズマ研究または

炉工学のみで決まるわけではなく, 核融合炉工学として双方の問題意識の共有と連携のうえで, 初めて適切な方向に研究開発が進められることが示された。各講演の要旨は下記のとおりである。

宮澤順一氏(核融合研)は, 「ヘリカルプラズマ研究を通してみた原型炉開発課題」と題して, 炉心プラズマが自己点火まで見通せるようになったかどうかの問題提起を行い, トカマク・ヘリカル・レーザーにおける最近の核融合三重積の進展, LHDでの高密度内部拡散障壁(IDB)プラズマ, アニリング運転の成果をもとにした高密度領域からの第2のアプローチ, アルファ粒子の損失等を考慮に入れたローソン条件の再考と裕度の必要性を論じた。

武智 学氏(原子力機構)は「トカマクプラズマ研究を通してみた原型炉開発課題」と題する講演を行った。現時点での日本における原型炉開発計画では, ITER規模のコンパクトな原型炉が期待されているが, その実現にはITERの標準運転よりもさらにプラズマパラメータを高性能化することが開発課題として挙げられている。本講演では, 最近のトカマク研究の視点から, 特に高ベータ, 高自発電流割合, 高閉じ込め, 高密度の開発課題の目標値の妥当性と今後の研究課題が示された。

芹澤 久氏(阪大)は, 「溶接・接合技術からみた原型炉開発課題」と題する講演を行った。TBMを例として, 原型炉ブランケットでも問題となり得る接合技術課題について講演いただいた。特に, 接合・溶接技術としては多くの選択肢が存在すること, さらに接合仕様を検討するにあたって接合技術には相似則が通用しない点, および基本継手の結果が単純に実施に適用できない点に留意すべきことが指摘された。

笠田竜太氏(京大)は, 「材料開発研究からみた原型炉開発課題」と題する講演を行った。原型炉開発段階での材料開発研究は, 原型炉設計技術開発を中心としたより具体的な設計のための研究段階に移行すべきことが指摘された。さらに, 多くの課題が他分野で解決されることを期待することで分野の狭間に落とし込まれている問題点を指摘し, それを可視化するツールとしてプラズマシミュレーションから炉工学関連シミュレーションまでカバーする, 「ヴァーチャルブランケット(V-BLK)」が提案された。

長崎百伸(京大), 谷川博康(原子力機構)

### 3.5 シンポジウムⅤ「プラズマ物理の展開-炉心プラズマの制御をめざして-」

最後のセッションは, 他にパラレル進行のシンポジウムがあったにも拘らず, 100名近くの参加があり, プラズマ物理の側面から炉心プラズマの制御を題材に活発な議論が行われた。

趣旨説明(高瀬(東大)): ITERに代表される燃焼プラズマでは, 自己加熱が支配的となり, 不安定になりやすい。ITERより高ベータ, 高自発電流比が要求される原型炉では, プラズマの自律性はさらに高まり, その制御は著しく困難になる。このような状況下で, できるだけ高性能なプラズマを安定に定常維持し, 研究開発をより高効率に進めるには, プラズマ応答の物理的理解に基づいた制御法の開発が不可欠である。

居田克己氏(核融合研)から「閉じ込め改善モードにおける輸送の安定性」と題して講演が行われた。プラズマの温度勾配, 乱流, 層流(又は帯状流)は, 与えられた熱流束に対し多重解をもち得るため, 異なる輸送解(閉じ込めモード)間の遷移が起り, 温度勾配がジャンプする1次遷移と温度勾配の時間変化がジャンプする

2次遷移が存在する。乱流輸送が支配的なLモードと乱流が抑えられた閉じ込め改善モードは共に局所安定であるが、摂動に対する復元性はLモードの方が大きい。輸送曲線からの温度勾配のずれに対する確率密度関数を実験的に調べ、確率密度関数 $P$ がポテンシャル $S$ を使うと $P = \exp(-S)$ で決まるとして、輸送ポテンシャルを導入し、復元性を定量的に評価できる。炉心プラズマを制御するにはより復元性の高い改善閉じ込めモードが必要なので、ITERにおける燃焼に見通しがついた現在における新しい物理の展開として、輸送ポテンシャルに関する研究が重要となってきている。

大野哲靖氏(名大)から「境界プラズマの物理と熱・粒子輸送制御」と題して講演が行われた。境界プラズマでの燃料粒子・不純物粒子の輸送制御、プラズマ対向壁への熱流制御は、定常高性能炉心プラズマ制御に必須である。これらに有効と考えられる非接触プラズマの物理的理解は進んだが、実機への適用に関しては、非接触プラズマの安定性の更なる物理的理解と、非接触プラズマの長時間維持・制御と炉心プラズマとの両立性の実証が急務である。また非接触プラズマによる熱流制御において、プラズマプロブ(塊)による対流的輸送の寄与を示唆する実験データが新たに示された。

坂本宜照氏(原子力機構)から「加熱装置と炉心プラズマ制御」と題して講演が行われた。経済性の高い定常核融合炉の実現に必要な、高自己加熱( $f_{\alpha} > 80\%$ )、高自発電流( $f_{BS} > 75\%$ )、高規格化ベータ( $\beta_N > 3.5$ )をもつ先進トカマクプラズマを安定に維持するため、電流・回転分布の最適化による高い閉じ込めの維持、および圧力・電流分布の最適化によるMHD安定性の確保が必要である。そのためには実験・理論両面からの炉心プラズマ物理的理解、機動力のある加熱装置システムの構築、実時間プラズマ診断に基づく炉心プラズマの複合制御をITERやJT-60SAで開発する必要がある。

笹尾眞實子氏(東北大)からは「炉心制御に向けたプラズマ計測」と題する講演が行われた。ITER ITPAおよび科研費特定領域「プラズマ燃焼のための先進計測」の経験に基づき、燃焼プラズマの制御に必要な計測について議論された。燃焼プラズマでは、アルファ粒子加熱(内部熱源、正帰還性)という条件が加わり、その制御シナリオは極めて複雑となり、ダイバータにも厳しい制御が要求される。従って、制御シナリオに最適化されたプラズマ計測が必要であり、さらにそのデータ処理と高速リアルタイム解析、アクチュエータとのリンクを含めた制御ネットワーク構築等が必要である。先進シナリオにおいては分布計測と制御ネットワークをリンクさせることが重要である。計測や制御の小さいミスが大きくなるあるいは致命的な損傷をもたらす可能性があるため、計測においてはバックアップ、クロスチェック手法・自己診断手法の確立が不可欠である。

高瀬雄一(東大)

### 3.6 シンポジウムVI「原型炉に向けた開発計画」

連合講演会初日のパネル討論会で、ITERの池田要機構長から、環境問題への寄与を考えたら、核融合エネルギーの早期実用化は必須であり、ITERはその気概で進めているとの強い決意表明がなされた。特に欧州では核融合エネルギーへの期待は大変大きく、Fast track路線が数年前に提唱された。また最近では、中国でも核融合エネルギーへの期待が高まってきており、プラズマ実験

装置建設・運転でも着実に実績を挙げてきている。一方、米国では原型炉においても、高い経済性と信頼性を要求しており、炉心プラズマ研究への比重がまだ高い。

このような状況に鑑み、我が国でも、核融合エネルギーフォーラムITER・BA技術推進委員会下に、ロードマップ等検討ワーキンググループ(WG)が設置され、核融合エネルギーの実用化に向けた議論が開始された。本シンポジウムではこのWGでの議論を中心として原型炉に向けた開発計画について3つの講演があり、まさにタイムリーなシンポジウム企画であったと言える。特に原型炉世代を代表する若手研究者2人から、原型炉開発の在り方や進め方についての考えを聞いたことは、大変意義深いものであった。

最初に、座長である岡野邦彦氏(電中研)より、WGでの検討結果が報告された。本WGでは、21世紀中葉までに核融合エネルギーの実用化の目的を得るためのロードマップを検討している。ロードマップ構築にあたり、まず原型炉建設に向けて必要なR&Dについて、1000を超える項目からなる技術マップ(WBS)リストを作成した。このWBSリストを用いて、各々のスケジュールを検討し、多くの技術選択の決断時期を明記することにより、全体ロードマップを描いた。その結果、2050年代に初代炉を投入可能な開発計画が作成できている。ただし、ITERの連続燃焼実現前に、その成功を前提に準備を進めておかなければ間に合わないこともわかった。また原型炉建設にむけて極めて重要にもかかわらず、現時点で開発計画がないか、不十分な技術項目が発見され、その推進の必要性が指摘された。

次に、谷川博康氏(原子力機構)より、原型炉をめざしたR&D計画の紹介があった。同氏は上述のWGメンバーでもあるので、WGで検討されているロードマップの時間的スケジュールに即したR&D項目の推進計画を整理して紹介していた。特にブランケット開発という点では、構造材料や増殖材・冷却材に留まらず溶接技術なども含めた、複合的総合化技術が重要であり、その最初の試金石がTBMであるとの指摘であった。またロードマップ上でのIFMIFの役割と先進ブランケット開発の位置づけなどもわかりやすく説明されていた。最後に、極端な装置の小型化などは核融合炉の技術的成立性を危うくするという側面もあり、やはり炉心プラズマ性能と炉工学技術の問題意識の共有化や整合性を図りながら開発を進める必要があると指摘していた。

最後に、日渡良爾氏(電中研)より、原型炉の具体的な設計例について紹介があった。同氏はまず、早期実用化を重視した欧州と、経済性に重きを置いた米国との違いについて外観し、我が国がどちらの路線を進むべきか、との問題提起をした。我が国では、前者の設計としてDemo-CRESTが、後者としてSlim CSが挙げられる。ただし同氏は、両者に共通した開発項目と、夫々独自の課題とを分けて議論する必要があると指摘していた。またさらには、発電に向けた技術課題の詳細な理解とITER・IFMIF・DEMO炉R&D活動へのフィードバックの重要性を指摘した。そして、いくつかのDEMO炉(マスタープラン、バックアッププラン)に対する詳細な技術課題の検討・技術課題の把握、建設判断時にタイミングを逸することなくDEMO炉概念を提示できる体制の構築が重要である、とまとめた。

小川雄一(東京大)

## 4. ポスター講演

### 4.1 炉心プラズマ (磁場)

炉心プラズマ(磁場)のカテゴリーでは39件の発表があり、若手研究者や大学院生が主役となり、熱い議論が繰り広げられた。このうち、22件が大型ヘリカル装置(LHD)における研究に関するものである。一方、JT-60に関する発表が皆無であったことは大変遺憾である。京大のヘリオトロンJからの4件、東北大ヘリアックからの2件を合わせて、さながらヘリカル系のセッションであった。しかしながら、日大のFRCとRFPに関するもの、および東大、九大、兵庫県立大、名大から球状トラスSTに関するものなど、大学の多様性を示す基礎的な研究発表があったことも言及しておく。これらの発表の中で、井戸 毅氏(核融合研)による「大型ヘリカル装置における電位分布およびその揺動の振る舞い」の題目での、世界で類を見ない大型装置における重イオンビームプローブ測定によって、LHDプラズマ内部の電位構造とその揺動を観測した報告は高く評価され、優秀発表賞が贈られた。

LHDでは平成19年度に行われた実験においてイオン温度、密度、ベータなどのプラズマパラメータが拡大され、新たな実験領域で得られたプラズマを分析し、それらの特性の評価を行った研究発表が多くあった。また、粒子輸送、乱流揺動、高エネルギー粒子閉じ込め、回転変換の熱輸送への影響などの物理を議論したもののや、ダスト、ペレット溶発、周辺中性粒子圧力などに関して基盤となるものがあり、今後の新たな実験企画に反映されていくことが期待された。輸送、MHD平衡・安定性、高エネルギー粒子については大規模な3次元数値解析との比較が進み、それらの統合も試みられつつある。今後の精密科学への発展が楽しみである。ヘリオトロンJからはユニークな磁場成分となるバンビネスの制御による蓄積エネルギーや高エネルギーの閉じ込めへの影響が報告され、磁場配位の最適化が今後の改造を含めて議論されている。東北大ヘリアックでは熱陰極による電場の能動的な観測と制御を進め、閉じ込め改善に関する基礎的な議論がなされた。STについては九大QUEST、東大UTSTと、新装置の発表があり、他のSTとの連携による相補的な研究進展が期待される。

山田弘司(核融合研)

### 4.2 炉心プラズマ (慣性, ドライバー)

米国立点火施設NIFの点火実験開始とFIREX第一期計画の開始を前にして、レーザー核融合研究はランドスケープの変化前の静けさが特徴的であった。

炉心プラズマ: 白神宏之氏(阪大)は、コーンターゲットの爆縮のダイナミクスを調べた結果、コーン方向へ高速の流体の流れがあることを発見した。このような流れは爆縮密度を低下させるだけでなく、最大爆縮に至る前にコーンの先端部を破断して、加熱レーザーから爆縮コアへの結合効率を低下させる。長友英夫氏(阪大)は、2次元流体シミュレーションにより、白神氏の実験結果を再現し、さらにレーザー照射分布を制御することにより、この問題を解決できる可能性を示した。羽原英明氏(阪大)は、カーボンナノチューブをターゲットに用いると、加熱レーザーから高速電子へのエネルギー変換効率を向上させることを示した。谷本壮氏(阪大)は、高速点火に必要な超高強度の加熱レーザーにより発生する高速電子の温度が、動重力(ポンドロモティブ)ポテンシャルより低いことを発見した。予測されていた電子エネルギーでは、

爆縮コアとのエネルギー結合が低いことが懸念されていたので、この発見は高速点火にとって朗報である。中尾安幸氏(九大)はD<sup>3</sup>He主燃料とDT点火部から構成される高速点火の可能性を検討した。炉として成立可能な設計において、核融合エネルギー中の中性子が担う割合が1/10以下(DT燃料の場合は3/4)に抑制されることが魅力である。衝撃点火はベタワットレーザー不要の新しい点火方式である。城崎知至氏(阪大)は衝撃点火に必要な点火条件(インパクターの速度等)を初めて正確に求めた。H. Yang氏(阪大)はFIREX第1期で使用するフォームターゲットの化学的製作過程の見通しが立ったことを示した。プラズマ実験への供給技術の確立は今後の課題である。

診断技術: 高速点火は、時間空間スケールが中心点火より小さいので、これまでに増して診断技術の開発が重要な課題となる。田辺稔氏(阪大)は、単色X線ラジオグラフィとサンプリングイメージストリークカメラを組み合わせた新しいX線計測の報告を行った。古賀麻由子氏(阪大)は最大爆縮と加熱のタイミングを高精度で測定するためにX線フレーミングカメラの新しいオペレーションモードの開発を行った。有川安信氏(阪大)は燃焼時刻の計測のためにプラスチックシンチレータの立ち上がり時間を計測。従来の常識に反し、消光剤の添加により立ち上がり時間が伸びることを発見した。中新信彦氏(阪大)は高速電子のコア中でのクーロン散乱からプラズマの密度を推定する方法を検討した。細田裕計氏(阪大)は加熱レーザーによる電磁ノイズの増大に対する対策を実施し、中性子スペクトル計測への影響を検証した。

炉設計・炉工学: 後藤拓也氏(東大)は、高速点火に基づく超小型の発電炉として固体壁炉の可能性を検討し、プラズマに面した壁の金属疲労とプリスタリングが最大の課題であることを明らかにした。このため染谷洋二氏(武蔵工大)は液体型ブランケットの検討を行った。梶村好宏氏(九大)は、磁場の導入によりレーザービームポートをアルファ粒子から保護できることを示した。廣岡慶彦氏(核融合研)は慣性核融合炉内で発生するエアロゾル形成の模擬実験を行った。今後模擬実験の妥当性の検討が望まれる。

本講演会全体での慣性核融合関連発表19件(シンポジウム講演1件、炉心プラズマ9件、計測3件、炉工学・炉設計3件、高強度レーザー応用研究2件、理論・シミュレーション1件)は、わが国がこの分野で果たすべき役割からすると、とても十分な数とは言えない。諸外国が国家プロジェクトとして研究を展開している中で、わが国がしかるべき存在感を示し続けるには、レーザー核融合の全国展開がますます重要性を増していると思う。

疇地 宏(阪大)

### 4.3 加熱電流駆動

加熱電流駆動のポスターセッションでは、RF関連13件、NB関連10件を含む、合計24件の発表があった。ITER、LHD、JT-60U等の装置における設計や工学分野での研究開発が中心であったが、スフェロマック生成に関する発表も1件あった。

RF関連: LHDに関連した発表は4件。これまで大型装置では実現できていなかったECH入射偏波を、プラズマの状態に合わせてリアルタイム制御を行い、吸収効率を最適化する手法についての発表があった。さらにECHによる電子速度分布のゆがみがECE計測に与える効果についての報告もあった。またECHでは77GHz-1MWジャイロトロン導入、ICRFでは複素共役アンテナシステム

の検討が進んでおり、プラズマ加熱へ適用した場合の今後の研究成果が期待できる。JT-60Uに関連した発表は2件。ITER用ジャイロトロン開発で得られた成果を基にした、定格1 MWの110 GHz ジャイロトロン出力を1.5 MWへ向上させた開発において、1秒間の出力を確認した。ジャイロトロン各部の温度解析から、パルス幅をさらに延伸できる可能性があることが示された。また、水冷機構に可撓部分が不要で、漏水の危険性が極めて低い将来装置に向けたECH用直線駆動方式ランチャーについて、ポロイダル、トロイダル両方向へのビームスキャンを可能にする設計例がビームプロファイル計算によって示された。ITER関連では2件。ECHの水平ランチャーと上部ランチャーの設計の発表があった。ともにビーム解析が重要なテーマとなっている。なお別セッションにおいてITERでの目標性能を達成した170 GHz ジャイロトロン開発と今後の研究の方向性を示した報告が1件あった。その他、ガンマ10からは28 GHz ジャイロトロンとICRFアンテナとプラズマ結合解析、ヘリオトロンJCPD装置、TST-2から加熱電流駆動実験に関連した研究発表があった。最近のRF分野では電子サイクロトロン加熱・電流駆動に関する研究が中心の話題となっている。

**NB関連:** LHDに関連した発表は2件。一つは、負イオン生成の鍵を握るセシウムの挙動に関する研究、もう一つは負イオン源、および加速器の安定な長パルス運転に関する研究であり、10秒間のビーム加速が報告された。JT-60Uに関連した発表は3件。電界補正板を用いたビーム偏向補正、および電子ビームダンプ設置による熱負荷対策により、30秒の長パルス運転を達成したことが報告された。また、大面積ビームの偏向補正として孔ずれ補正の設計が報告された。

ITERに関連した報告として、ITER用加速器1 MV電源設計、アルファ粒子計測用 $\text{He}^+$ イオン源開発の報告があった他、なお別セッションで、原子力機構のMeV級加速器で逆流正イオンの熱負荷対策を実施した結果、世界最高性能(796 keV, 320 mA, 140 A/m<sup>2</sup>, H<sup>-</sup>)である負イオン加速に成功し、ITER用加速器として、原子力機構が開発してきた多孔多段型加速器が採用されたことが報告された。その他、NB用負イオン源の高性能化に向けた物理基盤研究となるRFプラズマ生成負イオン源開発、負イオン源の数値解析に関する発表があった。全体的な印象として、高出力ビームの長パルス化に向けて、熱負荷抑制が重要な鍵となっていることがわかる。

春日井 敦 (原子力機構)

#### 4.4 プラズマ計測

プラズマ計測には25件のポスター発表があり、そのうち15件が若手発表であった。このようにこの分野において若手が活躍していることが特徴としてあげられる。内容としては(1)中性子、ガンマ線、アルファ粒子等、THzレーザー開発等将来の核燃焼実験にそなえた新しい計測手法開発と(2)LHDなど実機での物理実験での結果の報告にめざましい成果が発表された。(1)については、中性子スペクトロメーター開発が4件(2件はITER用、1件はLHD重水素実験用、1件はFIREX用)で最も多く、会場での情報交換も活発に行われていた。また、アルファ計測のための粒子ビーム、ジャイロトロン開発等も報告された。(2)の物理実験のための計測について今回特にめざましい分野は、揺動の分布計測である。マイクロ波計測が3件、HIBP1件と手法は異なるもののどれも特徴を生かしつつ物理研究への貢献が大きいと期待される、あるいは

すでに貢献している結果が報告された。その他、空間分布計測のための解析手法の研究や、レーザー慣性核融合のための計測手法等を含めると他分野との連携が重要な役割を果たしているものが多い。どのポスターの前でも発表時間中多くの議論がかわされており、活気と熱気にあふれるセッションであった。

笹尾眞實子 (東北大)

#### 4.5 核融合工学 (超伝導, 第一壁)

本分野では、超伝導・第一壁関連の発表が17件あった。当面の課題に対応する研究開発、基礎過程の解明を視野に入れた研究、先進的な壁概念の研究など様々な研究が含まれ、この分野の研究の広がりを感じさせた。ただ、液体リチウム表面流(IFMIF関連)の発表2件とITERテストブランケットモジュール関連の発表1件は、ITER-BAのセッションに割り当てることが適当であろう。

現在ITERでは、トリチウム吸蔵低減の観点から、DT放電フェーズにおいてCFCの使用が疑問視されており、フルWダイバータの早期導入が検討されている。将来的に見ても、損耗が少ないWは、DEMO炉以降で第一壁材料の最も有力な候補材となっている。しかしながら、Wはコアプラズマへの蓄積、燃料イオン、ヘリウムイオン、中性子照射などによる材料の脆化、あるいは高熱負荷による溶融の問題などがあり、今後プラズマ制御や材料開発の視点も含んだ検討が必要である。

このような背景のもと、タングステン、炭素、あるいはボロンのプラズマイオン照射影響とその材料混合、および接合材料開発に関する発表が、過半数の8件を占めた。内容は、W被覆F82Hの熱負荷特性、炭素タイル上のタングステン堆積量の放射化分析、水素・炭素混合ビーム照射によるW上への炭素堆積、炭素・重水素イオンのタングステンへの同時照射による混合層形成と重水素吸蔵、高パワーイオン照射によるタングステンの損傷、高フラックス重水素プラズマ照射によるタングステンの重水素吸蔵、炭素含有ボロン膜中における水素同位体化学的挙動、およびナノ構造タングステン合金のHeイオン照射による表面剥離抑制機構である。また、材料のプラズマ照射効果をLHDで調査した研究もこの範疇に属する研究である。これらの研究は、壁材料開発や基礎過程解明など様々な視点から研究活動が行われており、特に国内でのこの分野の研究活動は活発であるといえる。今後は、学術研究としての研究の発展と、ITERやDEMO炉の設計や運転に資する工学的データベースの整備という理学・工学両面から見た場合の研究の深化が期待される。また、ダイバータの先進的な概念として、液体Li対向壁の具体的設計が示された。現在、DEMO炉以降ではWが唯一の候補となっている感があるが、上記の様にWには問題も多く、このような他のオプションにももっと目を向ける必要がある。また、慣性炉の第一壁のアブレーションとその後の壁材料の凝集過程についても、交差ブルーム法による基礎研究が紹介された。

超伝導コイルの開発では、超伝導マグネットの照射効果、V<sub>3</sub>Ga超伝導潜在の高J<sub>c</sub>化、分割高温超伝導マグネットの設計オプション検討の発表があり、ITERやDEMO炉を視野に入れた研究開発の成果が発表された。特に、実使用環境(低温)での照射効果研究については、喫緊の課題であるが研究成果は十分ではなく、早急な研究の進展が望まれる。

ITERのTBMを視野に入れた固体増殖ブランケットモジュール

の製作実証については、着実に進展していることが分かった。また、液体 Li 表面流の研究では、液体 Li の流れに関する基礎的な理解が進んでいることがわかった。 上田良夫 (阪大)

#### 4.6 炉材料

炉材料関連では33件のポスターが発表された。材料としては、低放射化フェライト鋼(RAFM)、バナジウム合金、SiC 複合材に加えて、酸化物分散強化鋼(ODS 鋼)およびプラズマ対向材としてのタングステンの研究が多かった。改良材も含めた素材の強度特性や照射特性、熱負荷特性などの研究ほかに、低放射化材料への第一壁用タングステン被覆、異種間も含む接合の研究が多くなってきたのは、第一壁・ブランケットの製作を視野に入れた研究の高まりを示すものである。ブランケット関係では、MHD 絶縁被覆や水素透過防止被覆の研究が継続的に進められている。今回の大きな特徴は腐食に関する種々の研究が報告されたことで、これまで続けられてきた液体リチウムによる MHD 被覆セラミックス材やバナジウム合金の腐食に加え、熔融塩FlibeやFlinakによる RAFM 等の腐食、Li-Pb による RAFM および SiC 複合材の腐食など、液体ブランケット各概念に対応した腐食研究が急速に発展している。手法も、静止浸漬試験だけでなく、回転強制流動試験、自然対流流動試験などが行われ大きく進展しつつある。固体増殖関連においても構造材との界面反応の研究が報告された。また、IFMIF 要素技術開発として、疲労試験、破壊特性試験のための微小試験片研究、ターゲット用異材溶接研究が報告された。PSI 関係においては、混合プラズマによる損耗や低エネルギー (~1 eV) 水素原子による化学スパッタリング、再堆積、ダスト形成など、第一壁やダイバータに関わる広範な課題に関する研究が報告された。材料モデリングに関しては SiC の照射欠陥に関するものだけが報告され、やや低調な印象を受けた。全体として、素材の一層の高度化や照射データベースの充実、それらに関する基礎研究に加え、テストモジュール製作も含めたブランケットの工学技術や IFMIF 利用に向けた技術開発に関連した材料研究が進展していることがはっきり示された。 室賀健夫 (核融合研)

#### 4.7 トリチウム、ブランケット

一日目のポスターセッション「トリチウム・ブランケット」では、トリチウム関連研究とトリチウムに関連するブランケット研究の21件が報告された。ブランケットの研究に関連する製作技術開発については、構造材開発に関連するセッションにまとめられていた。

このセッションでは、名称のとおり、トリチウムに関連するものが21件中16件を占めていたが、そのうち、ブランケットにおけるトリチウム研究が12件であり、トリチウム研究がブランケット開発において非常に需要であるという認識の下で研究が進められていることがわかる。これらは、おおむね、ブランケット増殖材あるいは第一壁での、トリチウムの生成、放出、壁面を通しての透過漏洩、壁面でのトリチウム蓄積についての評価である。これらの評価を精度よく行うことは、ブランケットシステムの、ひいては核融合炉のトリチウム管理を確実にし、燃料トリチウムの必要十分な生産をおこなうためである。ブランケットに関連する研究は14件あり、その内訳を見ると、固体増殖ブランケットに関連するものが3件、液体増殖ブランケットが11件である。液体ブラン

ケット関連のうち、MHD 防止膜、腐食防止膜、透過防止膜、およびトリチウム透過に関連するものが9件で、固体壁-液体増殖材界面現象に係わる研究が、先進的な液体増殖ブランケットの重要なテーマであることがわかる。中性子工学研究は、別セッションにまとめられているが、このセッションには、特に、ブランケット体系を模擬した体系での中性子工学に関する実験的研究が、固体増殖、液体増殖ブランケット1件ずつ報告されており、中性子工学的な研究の取り組みも着実になされていることがわかる。

全体的に、トリチウムシステムとブランケットの開発を進める上で非常に重要な課題が、多くの制約の中で取り上げられており、トリチウム・ブランケット関連研究者の最大限の努力を実感した。一方で、原型炉へのスケジュールを考えたときに、もっと研究を加速しなければ間に合わない、との切迫感を感じる。

研究開発を進める上で、最も重要で欠かすことができないこと、すなわち炉工学技術の研究施設の運転や維持管理に関するものが2件あったことも記しておきたい。これらの着実な努力があつてこそ、はじめて、核融合炉の実用化と、それによる人類への貢献が可能となるのである。 榎枝幹男 (原子力機構)

#### 4.8 炉システム設計

全16件が発表され、内6件が若手・学生発表であった。ヘリカル炉設計 FFHR 関連7件(核融合研、他)では、最近の LHD 実験成果である IDB/SDC 高密度での自己点火と熱的不安定性の PID 制御法提案およびダイバータ熱負荷低減メリット、中性子壁負荷を低めに抑えた大半径 16 m 前後の炉サイズの優位性と設計統合シナリオ、その設計感度解析と経済性評価、そのための R&W 大型 CICC 超伝導マグネット概念および高温超伝導採用の間接冷却概念、ブランケット空間確保のためのスプリットコイル概念、および排熱利用電気分解の水素製造、が一括して示された。トカマク型(東京大)ではコアプラズマ中心を RF、周辺を NBI で分布制御する高 N ベータ (6.0) 平衡解の提示、原型炉設計 SlimCS (原子力機構)では中性子増倍材 Be12Ti で正味 TBR>1.05 を得るには60%以上の濃縮 6Li が必要、CO<sub>2</sub>排出からみた炉型評価(名大)では常伝導コイル ST が最も低くヘリカルとトカマクは同程度、3He 燃料での運転最適化(名大)では核融合出力での中性子割合と外部加熱入力を評価指標として1次元解析を推進、等が示された。高速点火レーザー炉設計 FALCON-D では流体不安定性成長の小さい炉心最適化と超微粒子タングステン固体壁による良好な設計見通し(東大、電中研、他)、液体 LiPb ブランケット (90%濃縮 6Li, 90%被覆率)による Be 使用量低減と自己冷却可能性評価(武蔵工大、他)、が固体壁との比較評価で示された。中性子工学関連(原子力機構)では FENDL-2.1 と JEFF-3.1, ENDFB/B-VII.0 等の最新の核データライブラリーによる DT 中性子工学積分実験の精度検証が示された。高温核熱利用のバイオマスからの水素製造(京大)ではセルロースの吸熱反応とコバルト触媒による高いガス化効率実験に基づく熱交換型反応器の概念設計が示された。日米協力では昨年度から6年計画で開始した TITAN 計画「磁場および慣性核融合システムにおけるトリチウム・熱流動制御」による第一壁・ブランケット開発と統合モデル構築の全体計画と初年度成果が報告された。いずれも今後の展開が大いに期待される。

相良明男 (核融合研)

#### 4.9 プラズマ基礎・応用

本ポスターセッションでは24件の発表があった。この内、15件が若手研究者からの発表であり、基礎・応用研究の継続的な発展を図るにあたり心強い限りである。内容は多岐にわたっており、プラズマ・核融合研究の裾野の広がりという視点からは喜ばしいことである。

具体的には、超音速イオン流、超アルヴェン速プラズマ流やイオンセンシティブプローブ、さらには磁化プラズマの径電場制御や速度シアに関する基礎プラズマ研究が着実に進められている。また、核融合プラズマを意識して、ダイバータ模擬実験を狙ったトロイダルダイバータプラズマ模擬装置での研究、さらには直線型高密度プラズマ源や大気圧マイクロ波ヘリウム・ジェット放電などの提案があった。またシートプラズマでのプラズマ流速とICR加熱や、衝撃波管によるCO<sub>2</sub>ガスダイナミックレーザーの研究も進められている。

プラズマの生成や応用としては、ホローマグネトロン高周波プラズマ、多相交流放電プラズマ、大気圧プラズマトーチ、小型擬火花放電プラズマジェットなどが研究されている。新材料の創成をめざして、カーボンナノチューブやフラーレンも進んでいるようである。核融合中性子の利用という観点では小型核融合中性子源の開発も進められている。また半導体分野への応用をめざした極端紫外光源開発も着実な進展をしている。

学術的な分野では、磁気リコネクションや内部導体トーラスの研究が進められている。またイオンビームのWDMに関する研究やレーザーでの地球・惑星研究なども提案されている。大学の研究室規模でのプラズマ実験として、若手研究者が様々な工夫をし、努力しているのが大変印象的だった。ただしこの分野から若手優秀賞は選ばれなかったのが残念である。 小川雄一（東大）

#### 4.10 理論・シミュレーション

本セッションでは、輸送3件、MHD6件、ダイバータ・不純物2件、加熱・電流駆動2件、材料2件、レーザー1件、数値解法1件と多岐にわたる発表が合計17件あり、熱心な討論が行われた。粒子軌道幅の有限性を考慮できる新古典輸送コードを用いてLHDの高 $T_i$ プラズマのシミュレーションを行い、従来の理論で予測された負電場とは逆の正電場が現れる可能性が示された。トカマクにおけるプラズマ回転と径電場を考慮できる1次元輸送コードにリップルモデルを組み込み、リップルによる高速イオン損失がプラズマを中性粒子ビーム入射方向と逆に回転させ得ることを示した。輸送・MHD安定性・SOL・ダイバータ・中性粒子を考慮した統合コードにより、ELMサイクル機構の解明が進められた。非線形MHDコードにより、LHDで短波長モードが長波長モードの成長に影響することが示された。アルファ粒子とアルヴェン固有モードの共鳴相互作用を調べられる高エネルギー粒子・電磁流体連結コードのヘリカルプラズマへの拡張等の最近の進展について報告された。トロイダル回転を考慮できるMHD安定性解析コードが開発され、周辺モードが安定化されることを示した。抵抗性壁モードに関する発表が2件あり、簡約MHD方程式を用いて帰還制御のシミュレーションを行い安定化に必要な帰還ゲイン等を示す一方、エネルギー汎関数法を用いたより詳細な解析コードの開発とベンチマーク結果が示された。トカマクにおけるタングステン輸送の解析のためにモンテカルロ輸送コードと壁の損耗・再堆積

コードを結合した結果、従来考慮できなかった壁での反射により非接触プラズマでコア領域への侵入量が増加することが明らかにされた。ダイバータでの中性粒子に対する流体・粒子モデルを比較し、非接触プラズマでは分子を考慮した粒子的手法が重要であることを示した。統合コードを用いて、トカマクにおけるICRF加熱への速度分布関数の変形効果、球状トカマクにおけるEC波の波動伝搬時のモード変換・波の共鳴を示した。ダイバータ板の損耗と熱収支の両方を考慮したモデルを実験と比較し、シース電場とイオンの価数の影響が大きいことを示した。慣性核融合においてレーザービームポートをアルファ粒子から磁場で保護できるか3次元ハイブリッドコードで調べ、衝突エネルギー負荷を保護しない場合の10%以下に抑えられることを示した。

林 伸彦（原子力機構）

#### 4.11 関連研究

本関連研究(K)セッションでは、ITER用機器の研究開発成果を中心に発表が行われた。具体的には、ITERに向けた、ジャイロトロン、ダイバータ不純物モニタ、上部計測ポートプラグ、ブランケット遠隔保守システム、マイクロフィッションチャンバー、ダイバータ、NBI負イオン加速器、トリチウム除去系、トムソン散乱計測装置に関する研究開発成果であり、ITERの建設が開始された熱気をうけ、ポスターの前では多くの研究者が集まり、活発な議論が行われた。また、ITER、BA、LHD、レーザー核融合に関わる開発成果および基礎研究成果として、JT-60の解体検討、LHD超音速クラスタービーム、大容量パルス負荷用電源システム、IFMIF用小型高出力密度ヒーター、3D-CAD磁力線・粒子軌道解析システム、プラズマ照射金属材料表面変化、磁場発生コイル用窒化アルミナ成膜、微生物によるリチウム回収とリサイクル、環境中トリチウム挙動と水素循環、という多様な研究開発成果が発表された。核融合研究の持つ、裾野の広さ、波及効果の広さを端的に示すものであり、この多様性を保ちつつ一層の進展が期待される。

本セッションのもう一つの特徴として、核融合ひいては原子力研究を進める体制等に関する、新たな試みが発表されたことを挙げることができる。八戸工大における原子力研究、大学における核融合アーカイブ進展、次世代エネルギーでの社会的受容性、核融合共同研究SNET、バーチャルラボラトリー遠隔実験システム、WEBを利用した遠隔実験、について発表があった。核融合研究は、上記のように裾野の広い巨大科学であり、かつエネルギーを発生することをめざした段階に進むことが求められている。日本の英知を結集し国際協力に取り組むべき課題であり、このような新しい研究体制、ハードのみではなくソフト面での新たな試みが定着・充実することが強く期待される。

山西敏彦（原子力機構）

#### 4.12 ITER-BA

このセッションでは、ITER-BAプロジェクトに関わる研究成果として22件の報告があった。そのうち、IFMIF-EVEDAに関するものが10件、炉材料やトリチウムに関するものが7件、サテライトトカマクを含めた遠隔操作実験に関するものが5件であった。

IFMIF-EVEDAに関しては、杉本昌義氏（原子力機構）らがプロジェクトの総括として全体の活動内容や計画の紹介を行った。神藤勝啓氏（同）らは、IFMIFのプロトタイプ加速器の開発計画を紹

介した。久保隆司氏（同）らおよび大西世紀氏（同）らは、それぞれ、加速器系に関連して、建屋の設計状況および遮蔽評価結果について報告した。加速器室の壁は150 cmのコンクリートで十分であるとされた。ターゲット系に関連する3件の報告では、まず、中村博雄氏（同）らが開発の現状、井田瑞穂氏（同）らが試験ループの設計、宮下誠氏（同）らが背面壁の開発状況を報告した。リチウムの最高流速は20 m/s、流れ厚さは25 mmとされた。背面壁外周部の熱応力を316L鋼の許容値以下にするには厚さを5 mm以上にする必要があると評価された。テストセル系に関しては、中村和幸氏（同）らが総括的に設計課題について検討した。若井栄一氏は、テストセル系における3つの開発テーマについて、現状と今後の展開について述べた。菊池孝行氏らは、照射後試験施設の詳細設計に関して現状を報告した。

ITER-BAにおけるIFERC活動に関しては、まず、荒木政則氏（同）らがIFERC事業全体の概要を紹介した。1) 原型炉設計・工学R&D調整活動、2) 計算機シミュレーションセンター、3) ITER遠隔実験センターの3つの活動の実実施計画や体制について述べた。西谷健夫氏（同）らは、原型炉工学R&Dの全体計画として、ブランケット材料およびトリチウム工学に関する技術開発計画について述べた。谷川博康氏は、ブランケット構造材料となる低放射化フェライト鋼の開発の現状について述べ、5 t溶解した鋼材の2次精練(ESR)と鍛造により、健全なスラブの製造に成功したと報告した。野沢貴史氏（同）らは、炭化珪素複合材料の破損基準策定に向けた破壊抵抗評価を実施し、脆性材料の破損基準は応力評価に基づいたものが妥当であると結論した。山西敏彦氏（同）らは、トリチウム(T)工学研究の展開について、多目的RI施設の設計内容を紹介した。T取扱量は3.7 TBq/日、T貯蔵量は7.4 TBqとした。星野毅氏（同）らは、各種Liセラミックスの溶解および回収プロセスの開発研究成果を報告した。奥村義一氏は、BA活動拠点となる青森県六ヶ所村の整備状況を報告した。整備は2008(平成20)年5月に開始し、2010(平成22)年3月に終了予定である。

石田真一氏（同）は、BA活動において主計画となっているサテライトトカマクのJT-60SAの設計について、年末の完成をめざした活動の現状を報告した。飛田健次氏（同）らは、原型炉設計活動の現状報告を行った。小関隆久氏（同）らは、ITERへの遠隔実験参加の基盤として、JT-60Uにおける高度ネットワークセキュリティを持つ遠隔実験システムの開発を実施し、ドイツのIPPとの実証試験結果について報告した。末岡通治氏（同）らは、ITER-BA遠隔実験に向けた実時間映像データ配信技術の現状を報告した。中島康平氏（同）らは、核融合分野での実験施設や計算機資源を有効活用するためのグリッド通信基盤として、原子力グリッド基盤を構築し、JT-60に適用した例を紹介した。

以上、ITER-BA活動に関する多くの報告があり、この活動が順

調に実施されつつあることが伺えられた。しかし、この活動は緒に就いたばかりであり、今後いろいろな形で難題が表面化することも予想される。DEMO炉開発に向けた研究者、とりわけDEMO炉世代と呼ばれる若手研究者の今後の踏ん張りが期待され、それを物心両面で支える体制の充足が望まれる。 木村晃彦（京大）

## 5. テクニカルツアー

六ヶ所村へのテクニカルツアーの参加者数は128名。バス3台に分乗して、6月20日午前11時半に青森駅前を出発した。それぞれのバスに同乗した、原子力機構の奥村、大平、杉本から、青森県の観光案内を交えた説明を聞きながら、完成間近の北縦貫道路を通って、午後1時過ぎに六ヶ所村の文化交流プラザ「スワニー」に到着した。

昼食の後、まず、幅広いアプローチ(BA)活動の本拠地となる六ヶ所BAサイトを見学した。同サイトでは既に今春から建屋群の建設工事が始まっており、来年3月の竣工をめざして管理研究棟の杭打ち作業が行われている。国際核融合材料照射施設(IFMIF)の原型加速器棟、スパコンやITER遠隔実験施設が設置される計算機遠隔実験棟、原型炉への研究開発を行うR&D棟など、見学デッキ上に展示されたミニチュア模型を見ながら、2年後の完成した姿を想像した。

午後3時には、日本原燃株式会社のPR館を訪れ、女性係員の案内で再処理のプロセスや放射性廃棄物の貯蔵のしくみ等の説明を受けた後、バスで日本原燃の敷地内を巡回して、再処理工場、低レベル廃棄物処理センター、ウラン濃縮工場などを見学した。残念ながら、各工場の中に立ち入ることはできなかったが、日本の原子力事業の核となる施設群の規模の大きさは実感できた。

天候に恵まれ、途中、自然豊かな青森の山々やむつ湾の景色を楽しみながらのバスツアーとなったことは幸いであった。青森市から遠いのではないかと心配したが、BAサイトの西4 kmの場所には北縦貫道路のインターチェンジが建設中であり、それができればさらにアクセスが良くなるという声もあって、参加者は六ヶ所をより身近に感じたようである。 奥村義和（原子力機構）

## 6. 優秀発表賞

本講演会では、ポスター発表者の中から、専門家の厳正な審査を経て特に優秀と認められた9名の方々に優秀発表賞が贈られた。以下に氏名(所属)を記載し、その栄誉を称える。(発表カテゴリー順(敬称略))

井戸 毅(核融合研)、柏木美恵子(原子力機構)、徳沢季彦(核融合研)、岡田耕一(東北大)、名倉 勝(東京大)、石川寛匡(静岡大)、渡辺淑之(京都市大)、萩原寛之(原子力機構)、星野 毅(原子力機構)。