

■会議報告

International Symposium on Fusion Nuclear Technology (ISFNT-8)

(核融合科学研究所 田中照也)

2007年10月1日から10月5日まで、落ち葉が散り始めたドイツ最古の大学都市、ハイデルベルグにおいて、標記第8回核融合技術国際シンポジウム (ISFNT-8) が開催されました。本シンポジウムは核融合エネルギーにより発電を行うための炉工学技術に関する最新の動向、研究・開発成果が議論される場で、参加者は約370人、発表総数は約270件(口頭発表77件、ポスター発表196件)でした。今回、日本からの参加者が多く、開催国ドイツからの91人に次ぐ70人で、他にフランス45人、米国32人と続きます。アジアからは中国22人、韓国20人、インド4人などでした。

会議における講演・発表は、ITER 関連(状況報告・技術開発・材料開発・建設準備状況およびTBM開発)、各極のDEMO炉(発電実証炉)までの核融合開発戦略、IFMIFの開発も含めた試験装置関連、DEMO炉設計および技術開発・材料開発、先進核融合炉開発などのテーマに分けられます。

冒頭において、すでにITERの建設が始まり、その成功が“MUST”であること、ITERの先にあるDEMO炉を押し進めるスタート地点に立っていること(Prof. R. Maschuw, FZK)、また、ISFNTは“Nuclear”の視点に重きを置いており、世界的に原子力ルネッサンスの流れが起こっていること、その点からも核融合の開発はますます重要になり、今回の会議がマイルストーンとなるように(Prof. S. Tanaka, Univ. of Tokyo)、という趣旨の演説で会議が開始されました。オープニング講演では、一般的な核融合の重要性から始まり、10年でITERとIFMIFを建設、10年間運転したのち、10年間でDEMO炉を建設するという、いわゆる発電まで30年の“Fast Track”の紹介とともに、定常プラズマ燃焼やディスラプションの制御、構造材料開発、第一壁・ダイバータの開発、トリチウム取り扱いなど、各開発項目の提示とITERからDEMO炉のどの段階で解決すべき(できる)かが示されました。また、より強力に研究を進める方法や更なるスピードアップの可能性の模索が必要であるとの話があり、前者に対しては発電炉と同等の中性子壁負荷で1~2週間程度の連続運転を行うCTF(Component Testing Facility)の提案について、後者に関しては開発目標条件を甘くすることでITERやIFMIFの結果を待たずに20年での発電をめざす“EDEM0”(early-DEMO)を建設する考え方も説明されました(30年でDEMO炉に持っていく“Fast Track”よりも速い、“Ultra Fast Track”)。ただし、これもITER同様、失敗すれば核融合炉開発にとって危機的な事態となるリスクもはらんでいるとの認識が示されました。(Dr. L. Smith, Chairman of ITER Council)。

ITER関連の発表は、カラダッシュサイトの状況(スタッフ数、整地の進捗)、組織現状と今後の研究者数や運転技術者数の増員スケジュール(12月で約200人、2008年春までに

300人以上)、現在、原子力施設としてのライセンス取得を進めていること、建設予定施設の紹介から始まり(Dr. N. Holtkamp)、その後、マグネットシステム、真空容器、建屋の紹介、また、日本とEUが青森県の六ヶ所村で進めるBA(ブローダー・アプローチ)計画についての講演がありました。いずれの発表においても、ITER設計で使用されているCADソフトによる統一感のある3Dイラストで、作成手順やパラメータなどが示されました。特に、今回は真空容器やトリチウム回収・処理システムの細かな3D・CAD図など、本報告者が始めてみる図もあり、少なくとも形を作り出す点では具体的な詰めが急ピッチで進んでいるとの認識を受けました。また、順次、建設のベースライン・仕様を決定して、各極が製作を始めるということで、進めていけば「こうすべきだった」等々細かいことは出てくるだろうが、よほど重大な事案でない限りは今後の仕様変更などはできないといった、釘を刺すような念押しもいくつかの発表でみられました。超伝導コイルなど多くの国が製作分担を行う部分では、分担割合や、その具体的な輸送経路なども示されました。

ITERと関係の深い、新しいプラズマ実験装置に関しては、ITER-BA(ブローダー・アプローチ)の説明の中でJT-60SA(日本)改修および高 β 、H-modeプラズマでの実験を行う計画が説明された他、KSTAR(韓国)では8月に装置製作がほぼ終了し、2008年のファーストプラズマをめざして、室温で真空排気やTFコイルのテスト、システムチェックを進めていることが説明されました。EAST(中国)に関しては、昨年ファーストプラズマを点け、現在は2つ目の実験キャンペーンに入っており、長時間パルス運転への確信を得ているといった発表でした。

ITER参加各極からはDEMO炉に向けての開発戦略の発表がなされました。EU、米国、日本からは各々のDEMO炉のパラメータやブランケット方式およびFast Trackにのった30年の計画についての発表がありました。その中で、各極に一つずつDEMO炉がいるのかといった問題提起や現在の環境問題との関連についての説明などがなされました。特にEUは構造材料や連続運転時間、経済性などの点で少し性能を下げてでも“EDEM0”(Early DEMO)を作る“Ultra-Fast Track”の議論を行い、これは、とにかく発電を実証することが重要で、本格的な定常運転は最終的な第一世代の核融合発電炉で行うと考え方です。特にEUは環境問題への対応の政治的後押しがある点も強調しているのに対し、米国の発表では産業界との話し合いの結果からは経済性に優れることが唯一の動機となる、としている点などで、環境問題への意識に違いがみられ面白く感じました。また、日本の発表では日本特有の課題として、高速増殖炉開発との競合が説明されました。ロシアは、固体増殖ブランケットおよびLi/V合金ブランケットを採用したDEMO炉設計および開発状況の説明がありましたが、図面がほとんどなく、文章の羅列であり、他極と比較してわかりづらい発表でした。中国はITER-TBM(Test Blanket Module)と並んでDEMO炉設計に関しても、多数の学生を含んだ強力な設計チームを有しており、精力的な設計活動

を進めていることを強く感じました。また、材料開発についても、基礎的な製造ノウハウの部分からという雰囲気はあるものの、特定のブランケット方式に対して集中して新材料の開発やトップデータを出すというよりは、ITER-TBM および DEMO 炉に必要な材料開発、コンポーネント開発すべてに対して研究開発を推し進めており、発表スライドからも、その手広さに驚かされます。物質的、人的資源の点などを考えると核融合炉分野でも、そこそこの性能の必要部材を世界に供給する工場となりうるのではないかと考えてきます。韓国は KSTAR や将来の材料開発スケジュール等に関してスライドや話のまとめ方はスマートであったものの、実際の材料開発の成果発表等はほとんどなく、中国の勢いとは対照的に感じられました。ただし、大統領が2040年までに核融合発電を実現させると発言していることが紹介され、政府が Fusion Energy Advisory committee を立ち上げたことが紹介されました。インドの計画には、本報告者は今回初めて接しました。トリチウムの取り扱い経験が豊富である点や、2004年に実験装置 SST-1、2022年に SST-2、2037年に DEMO 炉を建設するという計画が説明されました。DEMO 炉に関してはめざしているパラメータを紹介しているものの、詳細な設計はこれからといった感じでした。特に、2022~2027年に ITER と並行して実験予定の SST-2 はパルス運転で DT 燃焼をおこな

い、その結果から DEMO 炉の材料選択を行うとのことで、独自にコンポーネントテストを行える環境をもつ計画という点で興味を感じました。

ポスター発表においては、ITER や DEMO 炉、IFMIF 等にかかわる各種材料開発や設計の発表が多数行われ、その中から構造材料や機能材料、液体金属などについてレビュー的な各分野のまとめが口頭発表として紹介されました。それらと比較して、今回は特に、トリチウム研究に関して、回収システムやモデリング、供給等の口頭発表が多数あった点、また、本報告者も研究を行っているニュートロニクス（核融合中性子工学）分野の発表に関して、口頭発表件数が通常よりも多いと感じられ、「“Nuclear”を意識した会議」であることを感じました。また、日本、米国、ドイツから各々のステラレータ炉の設計・技術開発状況について、米国から NIF (National Ignition Facility, レーザー核融合) 計画についての講演がありました。

シンポジウム開催中には、街を見下ろす丘の上にそびえるハイデルベルグ城においてバンケットが開催されました。また、バスで30分ほどのカールスルーエにある FZK (Forschungszentrum Karlsruhe) 研究所の核融合炉開発に関連する研究施設へのテクニカルツアーも催されました。

次回は2009年10月に中国の大連にて開催予定です。

(原稿受付 2007年12月20日)

■会議報告

6th General Scientific Assembly of the Asia Plasma and Fusion Association (APFA 2007)

榊原 悟 (核融合研), 西村 新 (核融合研),
米田仁紀 (電通大)

標記会議が2007年12月3日から3日間、インド、グジャナート州の州都ガンディナガルにある Institute for Plasma Research (IPR) で開催された。APFA は1998年より隔年で開催されており、今回で6回目を迎える。会議参加国と参加者数は、インド74名(内 IPR は66名)、日本19名(NIFS; 9名, JAEA; 3名, 京大; 2名, 九大; 2名, 阪大; 1名, 電通大; 1名, 静岡大; 1名)、中国6名、韓国9名、オーストラリア1名、フランス1名(ITER IO)であり、6カ国から合計110名の参加者があった。分野の内訳は、基礎プラズマ22件、炉工学31件、慣性閉じ込め5件、工業応用11件、ITER 関係5件、磁場閉じ込め24件、宇宙プラズマ4件、定常運転4件であった。23件の招待講演が企画され、合計129件の発表が行われた。午前および午後招待講演、口頭発表が行われ、夕方から屋外にてポスター発表が行われた。以下に磁場閉じ込め、炉工学、レーザープラズマに関する発表の概要を記す。なお、レーザー関連については、APFA に先駆けて同研究所で行われた INSA-JSPS ワークショップの様子と合わせて報告する。

磁場閉じ込め関係の発表は24件あり、日本、中国、韓国、インドで建設、稼働中の各装置の現状および物理研究について報告がなされた。会議は松田慎三郎氏(JAEA)の幅広

いアプローチにおける日本の戦略および JT-60SA 計画に関する発表から始まった。JT-60SA は2008年初頭より建設を始め、ITER 実験開始の3年前となる2015年より実験を開始する予定とのことである。JT-60U からは最近の実験成果として、フェライト鋼設置後の閉じ込め特性、関連した抵抗性壁モード研究、高ブートストラップ比率放電などに関する報告がなされた。JT-60U 実験、JT-60SA 建設など、JAEA の今後の人員体制に関する質問に対し、共同研究および若手育成を考慮した研究体制の重要性が強調された。九州大学からは TRIUM-1M のプラズマ・壁相互作用に関する成果、および2007年度より建設が開始される QUEST の実験計画に関する発表があった。ヘリカル系としては、LHD における定常プラズマ研究、ヘリオトロン J における閉じ込めに対する磁場配位依存性、CHS における HIBP を用いた乱流研究に関する報告があった。ヘリカル型装置は残念ながら現在アジアの中で日本のみで装置が稼働中であるが、超伝導、加熱技術はもとより、乱流をはじめトカマクと共通する物理現象が数多くあり、会場からは多くの質問が寄せられた。開催国インドからは、現在建設中である超伝導トカマク SST-1 に関する現状報告があった。2005年よりコイル冷却系のテストを開始したがリークが発見され、現在は修理のため装置が解体されている。リークの詳細については炉工学セッションで多くの報告がなされた。修理完了後、2009年初頭より再組み立てに入るとのことである。同じく IPR にある Aditya-Tokamak は1989年より実験を開始した中型トカマクで、乱流、密度限界、ディスラプションなどに関する基礎研究が精力的に行われており、

招待講演に加えて数多くの興味深いポスター発表があった。韓国で建設されている KSTAR の現状報告では、真空容器にマイナーリークが発見されたが、概ね予定どおり準備が進んでおり、順調に行けば今夏には First Plasma が点火される。中国からは EAST, HT-7, HL-2A の実験結果に関する報告がなされた。ASIPP の EAST は昨年 IAEA 会議（成都）でのファーストプラズマ報告以降大きな進展があり、装置の double-null 化、可動モリブデンリミタ設置、15 の計測機器の増設などがなされ、最大プラズマ電流 500kA の生成に成功し、8.5 秒の定常放電 ($I_p \sim 200\text{kA}$) を達成した。同研究所の HT-7 はほぼミッションを達成しており、現在は RF ボロニゼーションなどのコンディショニング技術、プラズマ物理研究に加えて、EAST 用計測機器のテスト、および若手育成用の実験装置として稼動中であり、後 2、3 年でシャットダウンを迎えるとのことである。SWIP の HL-2A では、装置の現状報告に加え、最近精力的に行われている乱流計測の招待講演があった。GAM 振動の空間構造をラングミュアアレイを用いて明らかにし、高周波揺動の振幅の増減と GAM 振動との間に強い相関があることが示された。

炉工学関係の発表は 31 件登録されたが、その中には NBI や ECH などのプラズマ加熱装置の設計や性能試験、データ収集系の設計なども含まれており、かなり広い分野をまとめて炉工学と分類していたようである。プラズマ実験装置の運転状況などの装置の現状報告を除いた、炉工学にかかわる主要な発表は以下の通りである。まず、西村 (NIFS) による核融合炉用超伝導マグネット材料の中性子照射に関する発表がなされた。水素プラズマから D-D, D-T プラズマへのシフトが大きな流れとなっており、漏洩中性子、透過中性子による核発熱、放射化が、12T 以上の高磁場応用とともに、重要な研究課題であることが述べられた。会場からは、このような研究の重要性が指摘されるとともに、データの収集、新たな取得に関して大きな期待が寄せられた。KSTAR の冷凍系の報告が Y.S. Kim (NFRI) からなされた。圧縮機、冷凍機などの試運転が続けられており、第 2 番目の Distribution Box が 2 月頃に納入されると、完全にコイルシステムと冷凍系は接続され、来春から初めてのコイル冷却が開始されるとのことである。B. Sarkar (IPR) から



ITER 用の Cryo-Distribution や Cryo-Lines の設計状況が報告された。カダラッシュでの設置、試験運転までがインドの責任で、運転は ITER の責任とのことである。SWIP の Liu Yong が西南物理研究所 (SWIP) の研究の状況を要約、紹介した。HL-2A は Upgrade したいようで、その予算獲得に懸命である。ITER 関係は、First wall & Shielding Blanket (GaInSi を想定)、Magnet Gravity Support, Gas Injection & Glow Discharge, Neutron Flux Monitor などを SWIP が担当する。後述する K.M. Feng の発表でも触れるが、ASIPP (合肥) との関係が不明確である。D.C. Reddy (IPR) の発表はインドの SST-1 の現状に関するもので、SST-1 は昨年秋から Cold Leak でトラブルが続いている。リークは 2 種類あり、液体窒素ラインと液体ヘリウムラインのリークである。液体窒素のラインに関しては電気絶縁継手 (GFRP) の部分が熱応力で損傷を受けリークしている。ヘリウムのラインは銅とステンレスの異材継手の溶接不良によるものである。いずれも 1 年程度で修理し、2009 年初頭から再組み立てに入る計画である。これに関連した新しい継手の設計、製作に関する発表が S. Pradhan (IPR) によってなされていた。SWIP の K.M. Feng が SWIP での炉工学関係の研究の現状を報告した。新しく CLF-1 という低放射化フェライト鋼を開発したということに関連して、日本の JLF-1 や ASIPP の CLAM などとの違いや、ASIPP との役割分担、ブランケット関係の総合的な中国の戦略などについての質問が出された。これらの質問に対して必ずしも明快な説明はなされず、中国内での多少の混乱を印象付けられた。

APFA 開催に先駆けて、IPR において High Energy Density Science の日本・インド国際協力にともなう INSA-JSPS ワークショップが行われた。インド側からは TATA 研究所の超短パルスレーザー実験グループ、IPR の理論・シミュレーショングループが参加し、日本側からは、大阪大学を中心とした超高出力レーザー研究、核融合研-阪大を中心とした Fast Igniter のシミュレーション研究、および、電通大を中心とした Warm dense matter 研究のメンバーが参加した。会議では、いくつかのトピックスの講演 (30 分の講演が 1~2 件) の後、1 時間~1 時間半の時間をとって、詳細な議論を行った。場合によっては、他の関連論文の情報の必要があったが、そのような場合にも、その場でスクリーン上に提示された論文を全員が読みながら議論を進めていった。様々な側面からのアイデア、理論、実験双方からの提案、具体的な共同研究提案などが行われ 2 日間ではあったが、非常に密な議論が行われた。

APFA でのレーザー関連の講演は、阪大レーザー研の三間氏が Fast Igniter 研究について招待講演を行ったほか、NIFS からの Fast Igniter 用コードの開発、IPR から高速電子発生 of 新しい物理モデル、超高強度レーザープラズマ中のソリトン波、インド Bhabha 研究所から high Z を入れたフォイルの加速向上の報告などがあった。三間氏は、アジアおよび日本におけるレーザー核融合方策を紹介した。研究成果については、会議の性格や参加者のスペクトルを考慮してか、実験の詳細は省略され、主に LFEX 建設計画の話が中心であった。シミュレーション研究に関しては FI

3計画のまとめが紹介された。発表後、「高密度状態での電子のSTOPPINGが古典で設計していいのか?」「異常STOPPINGで計画をもっとフレキシブルな方向に変えることはないのか?」という前週のワークショップから継続した議論が行われた。個人的には、引き続き共同研究の可能性などをインド側の関係者に行ったが、全体としては、レーザープラズマ側の参加者が少なく、前週に行われたよ

うな密な議論が会場に出ることはなかったのが残念である。次回の日本開催時に期待したい。

なお、次期 APFA の President はプラズマ・核融合学会長の松田慎三郎氏(JAEA), General Secretary に西村新氏(NIFS)が選任され、次回の APFA は2009年10月に青森で開催されることが決定された。

(原稿受付 2008年1月17日)

■会議報告

13th International Conference of Fusion Reactor Materials(ICFRM 13)

佐藤絢一(京都大学)

2007年12月10日から14日にかけて、第13回核融合炉材料国際会議が開催された。ICFRMは二年毎にヨーロッパ、日本、アメリカ合衆国で持ち回りとなっており、今回はフランス、ニースのアクロポリス・センターで行われた。ニースは地中海に面した世界的な保養地であり、街には多くのホテルが存在する。この時期でも日中は暖かく、海岸では日光浴を楽しんでいるご老人を見ることができた。

今回はITERの建設サイトが決定した後の最初のICFRMであり、ITER Business Forumも同時に開催された。そのため、会議参加者の科学者とITER Business Forumに参加する産業技術者を合わせると1000人以上が会場に集まった。また、その業者がITER建設で使う技術を各ブースにて紹介していた。水曜日の午後にはITER建設サイトの見学も行われ、ITER建設への期待感が会場全体に溢れていた。

会議の参加者としては600人以上で、口頭発表が150件以上、ポスター発表が600件以上も行われた。参加者の割合としては日本人が最も多く、140人近くが参加していた。学生の参加者も多かったとの報告があり、今後も核融合材料研究に携わり発展に貢献してもらうことが期待される。口頭発表は、午前最初はプレナリーセッション、その後、10時半から昼休みを挟んで16時まではパラレルセッションで行われた。ポスター発表は月、火、木の16時半から18時を目安に時間が設定されていた。

今回の会議はITERの建設を間近に控えて、より実機に近く、実機で問題となりそうな部分に焦点を絞ったプログラム構成となっていたと感じられた。例えば、前回のICFRM-12では電子顕微鏡内での引張破断のその場観察から、照射欠陥や析出物と転位の相互作用の研究発表が多く行われた。シミュレーションに関しても同様のデータが多く発表されていた。しかし、今回は核変換により発生・あるいはプラズマの曝露によるガス原子の影響が実機では無

視できないことから、材料中のヘリウムの影響に関する研究発表が非常に多いという印象を受けた。その他にも、ITERのデザインの説明がなされたり、JETでのプラズマ対向壁のCやDの堆積の問題が報告されたり、DEMOを見据えた材料戦略などの発表も行われた。高エネルギー粒子の材料への照射損傷に関連する国際会議であることから、各国の高エネルギー粒子照射場の現状の報告もあり、新しい照射場である大強度陽子加速器における陽子照射材の組織観察やTDS測定の結果も紹介された。ヘリウムバブルが形成し、材料の劣化が進むという点では核融合材料に通じるところがあり、ヘリウムと材料の関連を調べる上で新しいことが発見される可能性を秘めている。また、各国からフェライト鋼よりも新しいODS鋼の方がより良いというデータが発表された。ODS鋼に関する研究発表は日本からのものが最も多く、日本のODS鋼の研究は他国を一歩リードしているという印象を受けた。しかし、その一方で、日本からのシミュレーションによる研究発表が少ないという印象も受けた。他国では、独自にポテンシャルの開発を進めているが、日本ではそのようなことはなく、その分出てくるデータも少なくおくれを取っているのではないかと考えられる。

水曜日の午後はITERの建設サイトの見学が行われた。参加者は180名を超え、建設サイトまでは会議の会場から片道約3時間かかった。ITERはフランス原子力庁CEAのカダラッシュセンター内に建設される。先に既存の施設である高速増殖炉とトカマク型のTORE SUPRAの見学が行われた。建設サイトにはまだ道も舗装されておらず、予定された土地の上に立つことしかできなかった。カダラッシュセンターに滞在していた時間は約2時間であった。

バンケットは会場からバスで30分程度離れた競馬場に移動し、そこで行われた。趣向が凝らされており、競馬が全3レース行われた。一着から三着の馬を3レースとも当てれば景品が出るという形式だったが、当選者はいなかった。次に、各賞の発表が行われ、最後に次回の会議の開催場所が発表された。次回は、2009年9月に日本、札幌で行われる。

(原稿受付:2007年12月28日)