

## 平成 27 年度第 1 回ダイバータ物理・工学合同研究会 発表概要

- ・筑波大学プラズマ研究センターシンポジウム
- ・プラズマ物理クラスター・スクレープオフ層とダイバータ物理サブクラスター
- ・炉工学クラスター・ダイバータサブクラスター
- ・炉工学クラスター・炉材料サブクラスター
- ・炉工学クラスター・ブランケットサブクラスター

開催会場： つくばサイエンス・インフォメーションセンター

開催日程： 7 月 30 日（木）12：00 ～ 18：30、7 月 31 日（金） 8：50 ～ 18：00

7 月 30 日

### 1 ダイバータ & PWI 物理研究 I

#### 1-1 LHD 周辺プラズマ研究の進展 田中宏彦（NIFS）資料 03-H27 フォーラム合同会合（掲載版）

昨年度実施の LHD 第 18 サイクル実験における周辺プラズマ研究の成果を報告した。不純物ガスパフ入射によるデタッチメント実験では、クリプトン導入により LCFS 内側まで放射領域を拡大することに成功したが、最大放射損失割合は増加していない。磁気島によりデタッチメント生成時に現れる 2 種類のバースト揺動について特徴を明らかにした。閉構造ダイバータは 1 セクションを高性能化し、19 サイクル実験ではさらに排気速度の高いクライオポンプを 3 セクション導入予定である。

#### 1-2 LHD における PWI 研究の進展 時谷政行（NIFS）資料 04-H27 フォーラム合同会合

「2014 年度に進めた PWI 研究課題の紹介」、「He 長時間放電における壁排気特性評価」、「共同研究 PWI 課題の結果」について順番に報告した。He 長時間放電では、2013 年度と 2014 年度の壁排気特性の比較を報告した。2014 年度では、2013 年度と比較して炭素を主とし鉄をわずかに含む Mixed-material 堆積層の形成速度が約 3 倍に増加した。しかしながら、壁排気に寄与すると予想される堆積層によるヘリウムの捕捉量は 2014 年度の方が低かった。今後の詳細な解析を必要である。LHD の PWI 研究提案は半分以上が核融合科学研究所外の共同研究者からの提案で占められており、大学との共同研究を積極的に進めることで、不明点を明らかにしつつ長時間放電のさらなる進展を目指す。

#### 1-3 JT-60SA ダイバータ運転検討の進展 仲野友英（JAEA）資料 05-H27 フォーラム合同会合

JT-60SA プロジェクトの目的と装置の製作状況を概説した後、研究計画の検討体制と現状の検討結果を説明した。研究計画ではダイバータ・SOL・PWI 分野に関して、主プラズマの運転シナリオと整合し、なおかつダイバータ板への熱負荷を設計値以下に抑えるダイバータプラズマの運転シナリオが求められている。この要求に対して SONIC コードにより行った検討結果をまとめて報告した。高ベータかつ完全電流駆動運転シナリオでは、主プラズマ周りのセパトトリクスでのプラズマ密度を低く ( $1.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ ) 抑えつつ、ダイバータでは熱負荷を  $10 \text{ MW/m}^2$  以下に抑えるためには Ar 入射による非接触プラズマの生成が必要である。これに対して、最大プラズマ電流で最大加熱パワー入射運転シナリオでは、ダイバータからスパッタリングによって発生する炭素の放射損失により非接触ダイバータが形成されると考えられる。つまり、Ar などの不純物ガスを入射する必要はない。将来のオプションとしてダイバータ板をタングステンに変更した場合には、Ar ガスなどを入射することによって非接触ダイバータを生成し熱負荷を設計値以下に抑える必要がある。

## 2 原型炉国内活動とダイバータ研究

### 2-1 合同コアチーム活動とダイバータ開発の位置づけ(ロードマップ等) 笠田竜太 (京大)

#### 資料 06-H27 フォーラム合同会合

文科省科学技術・学術審議会 核融合研究作業部会 (第6期) の要請(H25.2)を受けて発足した「核融合原型炉の開発に必要な技術基盤構築に係わる活動(合同コアチーム)」は、ITER 計画及び BA 活動や、LHD をはじめとする学術研究の進展を踏まえ、核融合原型炉の開発に必要な技術基盤構築の在り方を、我が国の核融合コミュニティの総意を踏まえつつ検討し、平成26年7月には技術課題の構造分析を主とする報告書を、平成27年1月には技術基盤構築に関して時系列展開した「チャート」を主とする報告書を上梓した。この中で、ダイバータ研究開発の戦略的加速について提言しており、例えば、JT-60SA については、原型炉設計と整合するデータタッチメント制御技術を開発するため、適切な時期にタングステンダイバータへの改造を図ることが求められることや、既存施設を越えた先進概念を含むダイバータ研究開発施設が国内に必要となることを提案している。

### 2-2 原型炉ダイバータ開発に向けた加速戦略の検討

#### 2-2-1 核融合エネルギーフォーラムへの検討の依頼 中塚淳子 (MEXT)

本年3月に発足した文部科学省科学技術・学術審議会研究計画・評価分科会核融合技術委員会では、核融合開発総合戦略タスクフォースを設置し、原型炉開発に向けたアクションプランの作成を進めることにした。その重要項目の一つとして「ダイバータ研究開発の戦略的加速の方策」の審議に必要な検討を、核融合エネルギーフォーラムに依頼することとなった。「合同コアチーム」のダイバータ開発にかかわる指摘、「チャート」の評価、および取り組み・体制等について研究開発を戦略的に加速すると言う観点からの検討を、本年12月初旬をめどにまとめることが、主な役割である。

#### 2-2-2 核融合エネルギーフォーラムにおけるダイバータ研究開発加速戦略方策検討評価WGの設置 堀池寛 (核融合エネルギーフォーラム・ITER・BA 技術推進委員会)

##### 資料 07-H27 フォーラム合同会合

核融合エネルギーフォーラムでは、ITER・BA 技術推進委員会のもとに「ダイバータ研究開発加速戦略方策検討評価ワーキンググループ」を設置して、物理・工学クラスターの担当委員ら専門家に上記の検討をお願いした。

#### 2-2-3 ダイバータ研究開発加速戦略方策検討評価WGにおける検討内容と予定 上田良夫

ダイバータ研究開発加速戦略方策検討評価WGの今後の活動方針を説明し、PWI 関連研究者の協力を求めた。核融合エネルギーフォーラムの依頼で要点の説明を行なった後、PWI 研究の課題の概要説明と今後の進め方について説明した。11月末頃までに報告書を作成する必要があることから、月2回程度のペースで会合を行なうことが示された。今後この分野の研究の進展を図るために、解決すべき課題を抽出してコミュニティの間で共有化し、研究開発の加速につなげるという基本的な方向性を示した。

### 2-3 原型炉設計合同特別チーム活動紹介 日渡良爾 (電中研) 資料 08-H27 フォーラム合同会合

6月に発足した「原型炉設計合同特別チーム」に関する活動状況について報告した。本活動は、「核融合原型炉の開発に必要な技術基盤構築に係わる活動(合同コアチーム)」の報告書の答申に基づき設立された。コアチーム報告書の「チャート」にある中間チェック&レビュー(2020年実施を想定)における検討項目(運転計画、原型炉基本概念、主要機器の設計・技術仕様等々)に応えるべく活動を開始した。また、本特別チームで採用したプロジェクト管理に関して、WBS(work break down structure)やプロセスマップの作成状況について紹介した。最後に、ダイバータ関係に関する合同コアチームの「チャート」とそれに対応する最近のBA原型炉設計活動からの成果について紹介した。質疑では、ダイバータシステム構築における主要な設計限界、実用化に向けた核融合出力増加とそれに必要な「先進ダイバ

ータ」の導入を予め原型炉設計に反映させる必要性などが議論された。

## 2-4 意見、議論：

### 2-4-1 合同コアチーム活動、タスクフォース委員からコメント 坂本隆一 (NIFS)

#### 資料 09-H27 フォーラム合同会合

原型炉ダイバータの開発を行うためには、一つの機能の改善だけでは対応できず、相反・相補する要素の総合的な最適化が必要になります。「原型炉設計合同特別チーム」には、すべての機能や要素を統合したダイバータシステムとしての成立性の提示をしていただきたい。そのためには、ダイバータ関連の個々の研究の深化と共に、ダイバータをシステムとして統合した上での最適化が必要です。そして、原型炉ダイバータ開発に向けた目標達成度を検証できる開発計画策定により着実な進歩を示していただけることを期待します。

### 2-4-2 原型炉から当該研究分野に求められる課題 松田慎三郎 (東工大)

#### 資料 10-H27 フォーラム合同会合

ダイバータは DEMO の重要課題の中で炉の構造に大きな影響があるという意味で研究開発戦略の策定は極めて重要である。ITER で DEMO レベルの実験的検証ができない以上、シミュレーションに頼るのか、或いは ITER を超える実験体系を製作してデータを取得するのか、いずれかの選択をして基本的な戦略を決めることが重要である。

DEMO 炉の出力制御の観点ではプラズマ密度が重要なパラメータなので、そのソース部にあたる周辺部での電離割合、電子密度の比例則を研究することが重要課題である。この分野の研究は重要であるにもかかわらず、極めて少ないことを注意したい。

### 2-4-3 ダイバータ材料中の水素同位体挙動に及ぼす中性子照射効果～日米協力 PHENIX 計画～

#### 波多野雄治 (富山大) 資料 11-H27 フォーラム合同会合

日米科学技術協力事業核融合分野 PHENIX 計画 (2013～2018 年) における中性子照射および照射後試験の概要を報告した。プラズマ対向材料の熱機械的特性およびトリチウム保持特性に及ぼす中性子照射の影響を明らかにすることは、ダイバータ開発における最重要課題の一つである。高フラックス核融合中性子源がない現状では原子炉を用いて中性子照射を実施するのが現実的解となるが、中性子スペクトルの違いには注意する必要がある。ダイバータ材料として有望視されている W では中性子照射により Re や Os 等の核変換元素が形成されるが、熱中性子が多い原子炉環境下での中性子照射ではこれらの元素が過剰に生成され、照射後の組成が核融合炉環境下で予想される値と大きく異なる。PHENIX 計画では特にこの点を考慮して Gd による熱中性子遮蔽を施したうえで、W および先進 W 合金の高温中性子重照射 (500～1200℃、1～1.5 dpa) を実施する。既に試料の調製をおおむね完了し、照射キャプセルの組み立て段階に入っている。照射後試験では耐熱負荷特性、熱伝導度、微細組織変化、水素同位体保持量・透過量等を評価する。これらの知見より、W 材料の耐中性子照射特性の統合的理解および解決すべき課題の抽出を目指す。

## 3 第 21 回 ITPA DIVSOL 会合 (6 月 PPPL) の報告

### 3-1 全体、定常熱負荷、モデリング、周辺プラズマ関係 朝倉伸幸 (JAEA)

#### 資料 12-H27 フォーラム合同会合(アジェンダのみ)

第 21 回会合は、プリンストン・プラズマ物理研究所で開催され、合計 48 名(日本から 4 名)の参加があった。2014 年 12 月より 3 年間、本グループの議長を H. Guo (IPP、中国)、副議長を K. Krieger (IPP、ドイツ) と R. Pitts (ITER 機構) が務め、プラズマ分野の実験研究は仲野 (JAEA) と T. Leonard (GA、米国) が、プラズマ材料相互作用の実験研究は増崎 (NIFS) と J. Coenen (FZJ、ドイツ) が、シミュレーション研究は S. Wiesen (FZJ、ドイツ)、K. Schmid (IPP、ドイツ) がまとめを担当する。本会合では 12 のセッションが行なわれ、ITER 機構から本トピカルグループへ依頼された物理検討(定常プラズマ放電でのダイバータと第

一壁への熱負荷分布、周辺プラズマのモデリング、ELMパルス熱流によるタングステン(W)対向材の溶融や脆化の影響、定常およびパルス熱負荷との同時照射による影響、ダスト微粒子の発生とモデリングなど) に関して最新の成果が議論された。

DIII-D よりプラズマ電流・密度・入射パワーなどプラズマパラメータによるセパトトリクス密度や SOL 熱流束幅の評価結果、DIII-D、NSTX、EAST 等から RMP、Li やガスパフ、LH/EC 入射時での熱流束分布幅の変化、モデリングとして SOLPS-ITER の使用や SOLPS での実験/モデリング比較、DIVGAS による排気シミュレーションの適応、統合周辺プラズマコード：SOLEDGE2D-EIRENE、3D 揺動輸送コード：TOKAM3X の状況など紹介が行われた。日本から 5 件の報告が行われた。JAEA プラズマ対向機器開発グループ (朝倉代読) より W モノブロックの研究開発と試験が成功したこと等が発表された (5-1 参照)。その他の発表概略は以下に述べられる。今回は、2016 年 1 月 25-28 日フラスカティ・イタリアが予定されている。

### 3-2 ELM、leading edge、ELM effect on PFC 増崎貴 (NIFS)

#### 資料 13-H27 フォーラム合同会合(表紙のみ)

ELM physics セッションでは、DIII-D における ELM 時のダイバータ板熱流束内外非対称性と、KSTAR における外側赤道面の静電プローブによる ELM フィラメントのパラメータ計測が報告された。Heat load to leading edges のセッションでは、DIII-D からはダイバータ板エッジ (ダイバータ DiMES) および COMPASS からは第一壁端部への熱負荷について報告があった。両装置の L-mode における実験では、JET の ELM 時に観測された熱流束の緩和効果は観測されなかった。また、ITER において高エネルギーイオンが、大きなラーマ半径のためにダイバータ板モノブロック間に入り込みギャップ部に大きな熱負荷がかかるという 3 次元イオン軌道計算からの予測について、PIC コードによる電場や電子の効果を考慮した計算、ASDEX-Upgrade における実験の結果が報告された。

PFC deterioration by ELMs セッションでは、QSPA-Be 装置では Be 被覆 W タイルへのパルス熱負荷実験、および W タイルへのプラズマ熱・粒子負荷とレーザー熱負荷の同時印加実験が報告された。また、兵庫県立大学グループが DIFFER で行った Al 蒸気遮蔽実験では、Al 蒸気による熱負荷低減が報告された。JET-ILW から ELM 時の W 発生について報告され、新たに W が水素化 W として損耗する可能性が示唆された。シミュレーション計算では、Purdue 大学で開発を進めている HEIGHTS パッケージと溶融層での液滴放出挙動計算が紹介された。また、ERO コードを JET および DIII-D での堆積層形成に適用した結果が示された。

### 3-3 同時照射効果、PMI とダスト 坂本瑞樹 (筑波大) 資料 14-H27 フォーラム合同会合(表紙のみ)

水素プラズマ中への不純物混合に対するタングステンの水素吸蔵特性への影響について、PSI-2 と Pilot-PSI の両装置において He 混合プラズマ照射により水素吸蔵量が減少することが報告された。また、PSI-2 では Ar 混合により水素吸蔵が増加することが示された。He 混合と Ar 混合での水素吸蔵特性の違いは、表面改質層の厚さと水素の飛程の関係に起因していること、すなわち表面改質層よりも飛程が長い場合は水素吸蔵量が増加し、短い場合は減少することが示唆された。APSEDAS ではタングステン表面に He バブル層を有する試料での重水素吸蔵量のフルエンス依存性 (重水素吸蔵量の飽和) が報告され、He バブル層が拡散障壁となっていることが示唆された。

### 3-4 タングステン照射関連発表まとめと意見などリ ハンテ (阪大)

#### 資料 15-H27 フォーラム合同会合

阪大のイオンビーム照射 (1 keV) 実験によるプラズマ中のネオンと窒素がタングステンの損耗とリテンションに及ぼす影響に関する研究報告をした。ネオンと窒素によるタングステンのスパッタ率は $\sim 0.3$  であることが分かった。実験結果とシミュレーション結果の比較により、ネオンの場合は実験値の方が 3 倍低く、窒素の場合は実験値がシミュレーション結果と近く、温度依存が 30%程度であることが分かった (550-800 K)。さらに、重水素(D)のリテンションについてはネオンの場合 1/10 に減少するが、窒素の場合は 10 倍増加すること

が分かった。さらに、Magnum-PSI を用いて、窒素と重水素の同時プラズマ照射実験を行い、表面近傍に蓄積された D/N 率がイオンビーム実験と同じ温度依存性であることが分かった。

## 4 ダイバータ & PWI 物理研究 II

### 4-1 GAMMA10/PDX におけるダイバータ模擬実験の進展 中嶋洋輔（筑波大）

#### 資料 16-H27 フォーラム合同会合

GAMMA10/PDX タンデムミラー装置のエンド部を用いたダイバータ模擬実験計画 (E-Div.) は、非接触プラズマの実現とその制御を目指して順調に進展しており、以下の結果が得られた。

- ・ アンカー極小磁場部への ICRF の追加加熱により、 $1.7 \times 10^{23}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$  の粒子束密度を達成した。
- ・ 水素と希ガス (Ar、Xe) を D-module 内に導入し、同部内での顕著な密度増加及び電子温度の低下 (2-4 eV) が観測され、コーナー部でのイオン束の減少が認められた。
- ・ 同時に高速カメラによるモジュール内の Ha 発光イメージの観測からターゲットコーナー近傍での暗い領域の発生し、非接触プラズマの実現が確認された。
- ・ 不純物ガス入射 ( $\text{N}_2$ 、Ne、Ar and Xe) の比較から Xe ガスがもっとも非接触化に効果的で、水素ガス分子の効果 (MAR) が重要な役割を果たしていることが明らかになってきた。
- ・ D-module 内 V 字ターゲット近傍の分光計測の結果から、不純物ガス入射量に伴う輻射の空間構造の変化と電離と再結合の過程がしだいに明らかになりつつある。
- ・ 今後、エンドミラー部 (プラグ/バリアセル) における追加加熱実験を通して、より高熱流・粒子束の生成実験を進め、様々なガスの入射による放射冷却の効果を検証することによって、非接触プラズマの制御に向けた研究を進めてゆく。

### 4-2 TEXTOR・直線装置協定報告 増崎貴（NIFS）資料 17-H27 フォーラム合同会合

IEA PWI 協定 (旧 TEXTOR 協定) に関する概要と現状が報告された。これまでの日欧米に加えて、近く韓国が正式に参加することになった。今年度の日本からの派遣予定が紹介された。来年度派遣の募集について、1ヶ月程度の派遣も募集することが紹介された。これは学生の派遣を念頭においたものである。

7月31日

## 5 ダイバータ工学と PWI 物理研究

### 5-1 ITER ダイバータ開発・製作関係 鈴木哲（JAEA）資料 18-H27 フォーラム合同会合

ITER ダイバータターゲットのフルタングステン化に伴う開発状況に関して報告された。JAEA においては小型ダイバータ試験体によるクオリフィケーションが成功裏に終了し、2014 年度よりフルタングステン外側ターゲット実規模プロトタイプ用プラズマ対向ユニットの製作を開始し、年度内に製作が完了したことが示された。ターゲット部の材料が従来の炭素繊維複合材からタングステンに変更されたことに伴い、最終機械加工による輪郭度の達成が困難となったが、製作後の輪郭度 ( $\pm 0.25-0.3\text{mm}$ ) について光学式 3 次元計測器を用いて寸法測定を実施した結果、これを満たすことが実証された。質疑応答では、厳格な輪郭度要求の必要性及び原型炉ダイバータへの展望が議論された。

### 5-2 水中爆接法を用いたタングステン被覆技術および評価技術の開発 笠田竜太（京大）

#### 資料 19-H27 フォーラム合同会合

先ず、タングステン被覆 F82H および銅材の新しい製造法として水中爆接法の適用性について、熱伝導特性や微細組織の観点から検討し、ブランケット第一壁やプラズマ実験機器用ダイバータ表面の W 被覆法として有望であることを示した。次に、現状では整理されているとは言い難い核融合炉内タングステン機器の機能健全性の考え方に関しての素案を提示し、①保全すべき機能/対象を明確化、②防止すべき事象、③想定される環境・負荷、④想定される破損様式、⑤想定外事象への対応方針、⑥被覆接合技術に応じた健全性評価法、⑦経年

劣化検査の考え方、などについて材料工学のみならず、プラズマ制御、安全工学、メンテナンスの観点から整理して、フォールトツリー解析への展開等を図る方針を提案した。

### 5-3 摩擦攪拌処理によるタングステン皮膜強化技術の開発 谷川博康 (JAEA)

#### 資料 20-H27 フォーラム合同会合

プラズマ対向材料として期待される真空プラズマ溶射 (VPS) W 皮膜の高空孔率を解消すべく摩擦攪拌処理 (FSP) による強化を試みた。FSP 処理により VPS - W の高空孔率を解消し、バルク W を超える硬さを広範囲で得ることができることを確認した。2 重に FSP 処理を施すことで、より稠密な W 組織を得られることが明らかになった。最適 FSP 条件 (600rpm / 50mm/min / 2ton x2) で強化した VPS-W では、VPS - W やバルク W に比べて等方的な粒となり、高温でもバルク W を上回る硬さを示し、かつ熱伝導率がバルク W とほぼ同等であることが示された。ただし、FSP 処理により溶射粒表面に形成された酸化膜が分散解消されるわけではないことが示された。イオン照射実験、熱負荷試験、D 注入実験が試行された。

### 5-4 W モノブロックの熱負荷損傷評価 木村晃彦 (京大) 資料 21-H27 フォーラム合同会合

高熱負荷 (20MW/m<sup>2</sup>, 1000 cycle) を与えたタングステンモノブロック (W-MB) には、熔融凝固や「き裂」が生じていた。熔融凝固や再結晶化により結晶粒径が粗大化し、それに伴って軟化および曲げ破断強度の低下が認められた。「き裂」は高熱負荷によりいわゆる再結晶脆化が生じたことによると考えられる。FEM 解析により「き裂」位置を予測することが可能であり、熔融は W-MB と Cu 冷却管との接合率が低い (接合状態が不完全) こと、あるいは電子ビーム照射初期の予期せぬオーバーロード (25MW/m<sup>2</sup> 以上?) によると推測される。

ITER の W-Diverter では約 40 万個の W-MB を使用することになるが、その徐熱性能は W-MB と Cu 冷却管の接合状態 (例えば接合率) に大きく依存する。原型炉においてはその数がさらに増えると予想されるため、機器納入時や運転開始後の接合状態が ELM などによる高熱負荷損傷の形成挙動に与える影響や、一旦形成された熱負荷損傷がその後の炉の運転に与える影響について検討し、接合率や損傷の「重篤さ」を示す指標を定める必要がある。また、その「重篤さ」を簡便に、かつ迅速に評価するための非破壊検査法の開発が望まれる。

### 5-5 磁化プラズマガンを用いた ELM 様パルスプラズマ照射実験の進展 菊池祐介 (兵庫県立大)

#### 資料 22-H27 フォーラム合同会合

磁化プラズマガンを用いた ELM 様パルスプラズマ照射研究の最近の進展を報告した。熱流束計測器として、従来のカロリメータとともに、高速時間応答 (数  $\mu$ s) を有する 2 色パイロメータを開発した。実際に W 試料にプラズマ照射したときの温度計測を実施し、その温度の時間発展から算出した吸収エネルギー密度 ( $\sim 0.4$  MJm<sup>-2</sup>, パルス幅  $\sim 5$  ms) はカロリメータ計測結果と一致した。一方、アルミニウム (Al) を用いたカロリメータ計測結果から、Al に吸収されるエネルギー密度は W の 30% 程度であることが分かった。この時、Al 試料前面には Al 原子発光線が観測され、プラズマ熱負荷により Al が熔融・蒸発していることが分かった。また、ITER ダイバータで予想されるベリリウム堆積層を模擬した Al 薄膜 W 試料に対して照射実験を行い、同様の冷却効果を確認した。Al の蒸発熱だけではこの冷却効果を説明することはできず、Al 蒸気層と入射されるプラズマの相互作用により、蒸気遮蔽効果が発生している可能性が示唆された。

### 5-6 タングステンの応力負荷による表面損傷に及ぼすヘリウム照射の影響 徳永和俊 (九大)

#### 資料 23-H27 フォーラム合同会合

W ダーバータ板の表面はプラズマからの高熱と高粒子 (水素、ヘリウム) の複合負荷を受け、損傷が発生することが懸念される。本研究では、プラズマからの高熱負荷により発生する熱応力と注入ヘリウム粒子の相互作用を調べることを目的として、予めヘリウム照射したタングステンについて高温引張試験を行い、低エネルギーヘリウム照射されたタングステンの表面損傷に及ぼす応力負荷の効果を調べた。ヘリウム照射材では、塑性歪みが 5% より大

きくなると、すべりによる塑性変形部分に未照射材では見られない亀裂が発生し、表面損傷を助長することが明らかとなった。

#### 5-7 ヘリウム照射により金属表面に形成される繊維状ナノ構造の成長過程に関する実験的考察 高村秀一（愛知工大）資料 24-H27 フォーラム合同会合

D-T 核融合反応の生成物としてのヘリウム (He) が高融点金属表面に及ぼす効果として、繊維状ナノ構造形成が危惧されている。その成長機構に多くの関心もたれているものの全容解明には至っていない。その特異なナノ構造と物理・化学特性から産業への応用にも興味を持たれる。多様な金属でその成長が調べられ、W、Mo、Re の高融点金属で類似のナノ繊維構造が見られるものの Ta では成長した形態が見出されていない。本講演では成長モデルを実験的知見に基づいて、大胆に提案する。初期段階のプリカーサーとしてループ形状があることに関しては既に報告した。そこから繊維状構造が如何に進展するかがポイントである。

He 原子、クラスターあるいはナノ・バブルを含む金属は成長が見られる表面温度において、水飴のような粘性流体に近い媒質になっており、He イオン照射により繊維の先端を中心にナノ・バブルをカスケード的に生成して金属流体を引き上げていくイメージが作られつつある。この際重要な物理指標は金属内の He 原子の移動性と固体としての剛性率 (shear modulus) と考えられる。前者は主として温度の、後者は He 含有割合と温度の関数である。繊維の成長にふさわしい剛性率の範囲  $\Delta G$  があり、それより大きいと伸長にとって固過ぎ、小さいと柔らかすぎて成長ができないと考える。 $\Delta G$  に入る温度範囲  $\Delta T$  が成長のための温度範囲となる。この温度で、He 原子の金属内での移動が保障されておれば繊維の成長が進むのではないかと考えた。

## 6 ダイバータ & PW I 物理・工学研究

### 6-1 NITE-SiC/SiC 複合材料および W-SiC/SiC 接合材料の開発 朝倉勇貴（室蘭工大）

#### 資料 25-H27 フォーラム合同会合

室蘭工業大学 OASIS では SiC/SiC の量産化やタングステンと NITE-SiC/SiC やグラファイトの接合に関する研究を推進している。本発表での接合方法は熱伝導度等を考慮し固相接合を選択し、タングステンと SiC/SiC は拡散接合で、タングステンとグラファイトは材料間に SiC グリーンシートを挿入することで接合可能であった。また、作製した試料を NIFS の LHD において無冷却の状態でタングステン表面側にプラズマ曝露を実施した。その結果、タングステン表面および接合界面の一部に溶融が確認されたが、板材の剥離、基材である SiC/SiC やグラファイトの破損は生じず、健全な状態であった。今後、詳細な界面の情報や熱影響等に関して調査を進めていく予定である。

### 6-2 JET ダスト分析の進展 芦川直子（NIFS）資料 26-H27 フォーラム合同会合（掲載版）

BA 活動として 2014 年 8 月から JAEA 青森研究センターにて JET-ILW 分析を開始した。ILW ダスト分析は EU では未実施で、本研究が初めての試みとなる。EDX 分析によりタングステン、アルミニウム、炭素が検出された。ベリリウム測定は EPMA、XPS にて六ヶ所増殖 Gr が保有する Be 粒子を使った測定試験が完了し、ILW ダストに対しては今後実施予定である。液体シンチレーション法を使って、ILW ダストの含有トリチウム量の直接評価に成功した。可溶化剤を併用したカクテル液を使用する等、新たな手法にて実施した。

### 6-3 JET-ILW タイル分析計画 増崎貴（NIFS）資料 27-H27 フォーラム合同会合

2014 年 12 月末に、JET ILW の第一回実験 (2012) で使用されたダイバータ板 (W 蒸着タイツのみ) から取り出した試料 21 個が六ヶ所の IFERC に搬入され、現在分析を行う準備が進行中であることが紹介された。欧州ではすでに本タイルの分析が数多く行われており、それらに対して日本としてどのような成果を示すことができるかを考えて分析を進めなければならない。日本ではタイル試料の IP、BIXS、TDS を用いた水素同位体蓄積分析、XPS を用い

た堆積層組成分析、TEM を用いた堆積層・損傷分析が予定されており、今後の分析スケジュールの概要が説明された。

#### 6-4 Self-consistent treatment of sheath boundary conditions by virtual divertor model

##### 東郷訓（東大院）資料 28-H27 フォーラム合同会合

非接触ダイバータプラズマのシミュレーション研究は実験との定量的な一致(ダイバータ板イオン飽和電流とセパトリクス密度の関係)を目指すことが課題となっている。本研究は超音速流が非接触ダイバータプラズマの形成過程で及ぼす効果について調べることを目的としている。既存コードでは平行方向運動量輸送方程式がイオン粘性項のために二階微分方程式となっており、シース入り口におけるマッハ数を境界条件として与えることで解いているが、非等方イオン温度を導入することでこれを一階微分方程式とすることができ、シース入り口のマッハ数を自己無撞着に決定することができる。境界条件を用いる代わりに「仮想ダイバータモデル」を導入している。このモデルではシース入り口を超えた場所に仮想的な領域を設け、そこに人工的なシンクを置くことでダイバータ板とシースの効果を模擬する。仮想ダイバータモデルによってボーム条件(シース入り口でのマッハ数が 1 以上)が自動的に満たされることや、シース熱伝達係数をシース理論の値に調整することを示した。またダイバータ領域の冷却により超音速流ができることを示した。最近では仮想ダイバータモデルに適応した中性粒子モデルを導入し、非接触ダイバータプラズマを含むより実際に近いプラズマの再現を目指している。

#### 6-5 液体金属ダイバータの新概念 宮澤順一（NIFS）資料 29-H27 フォーラム合同会合

核融合炉におけるダイバータには、容易なメンテナンス、少ない放射性廃棄物量、及び大きな耐熱負荷性能が求められる。この要求に応えるため、液体金属の鉛直自由表面流（Vertical Free Surface Stream、VFSS）を複数用いて構成される REVOLVER-D (Reactor-oriented Effectively VOLumetric VERTical Divertor)を考案した。ヘリカル核融合炉 FFHR-d1 では、EVOLVER-D をトーラス内側 10 カ所でエルゴディック層を横切るように配置することで、ほぼ全ての磁力線を集めることが可能である。ヘリカルダイバータ構造に沿ってダイバータ板を並べるとした場合に比べ、物量が大幅に低減できる。FFHR-d1 ではトーラス内側の上下にポートを設けることが検討されており、これらのポートを用いれば REVOLVER-D のメンテナンスは格段に容易となる。液体金属としては低融点、低蒸気圧、低コストで、かつ核的特性にも優れた錫 (Sn) を第一候補として考えている。

#### 6-6 工学・物理検討議論および今後の会合予定

- ・「ダイバータ研究開発加速戦略方策検討評価ワーキンググループ」の活動の進展については、フォーラムの本サブクラスター合同会合を本年後半にできれば開催し報告したい。
- ・来年度も同時期に同様な趣旨で筑波大学とともにダイバータ物理・工学合同研究会を開催したいと思う。会合の一部では、特定トピックスについてセッションをアレンジしているが議題に提案のある方はご意見をお願いしたい。

### 7 筑波大学双方向型共同研究の進展

#### 7-1 GAMMA 10/PDX 現状と計画 中嶋洋輔（筑波大）資料 30-H27 フォーラム合同会合

筑波大学プラズマ研究センターでは、「数億度の高性能コアプラズマと常温壁の両立」を目指して、筑波大の特長と強みを活かした電位/電場によるプラズマの閉じ込め・輸送とダイバータプラズマ模擬研究並びに関連機器開発、人材育成を積極的に進展させている。平成 27 年度の双方向型共同研究では、第 2 期中期目標・中期計画の最終年度ということで、境界プラズマ制御を目差した周辺プラズマ、PWI 研究、ジャイロトロン連携研究、計測等の共同研究で、全 26 件の共同研究を遂行中であり、今後境界プラズマ研究関連を中心としてジャイロトロン開発等拠点間連携を強化し、研究の進展をサポートしてゆく。具体的には、



- ・ダイバータ模擬実験：非接触プラズマと放射冷却ダイバータの物理過程の解明
  - ・ダイバータ部計測の充実：トムソン散乱、マイクロ波計測、新しいプローブ計測の導入
  - ・センター間連携の強化：ジャイロトロン開発（NIFS、九大）、新技術・ダイバータ・PWI等（九大、京大、東北大）等が挙げられる。
- 同時に、共同研究を介した教育、将来の研究者・技術者の育成を精力的に推し進めてゆく。

## 7-2 九州大学における先進炉材料開発と中性子照射効果 渡辺英雄（九大）

### 資料 31-H27 フォーラム合同会合

原型炉設計を目指した材料データの取得には、構造材料・プラズマ対向材料の中性子照射並びにこれを取り扱う施設の充実が不可欠である。九州大学・応用力学研究所では、筑波大学・東北大学との拠点間連携を進め、実機プラズマ装置内での RI へのプラズマ照射を目指して、下限数量以下の RI 試料の管理区域外での観察・電子線照射環境整備を国内施設では唯一完了した。一方、平成 26 年度には、国内最高精度の分析機器と球面収差補正機能を有する透過型電子顕微鏡 (ARM200FC) を RI 管理区域内に導入し、中性子照射材使用の拠点施設である東北大学大洗施設からの RI 輸送を開始した。高精度の STEM-EDS 法を用いることにより、従来の TEM 法では観察不能であった歪場を伴わない微小クラスターの直接観察が可能となった。本施設は既に共同利用にも供されており、今後も RI の使用を中心としての拠点間の連携を強化する。

## 7-3 GAMMA 10 ダイバータ模擬実験のためのマイクロ波イメージング干渉計用 1 次元アンテナアレイ 桑原大介（東京農工大） 資料 32-H27 フォーラム合同会合

GAMMA 10 ダイバータ模擬実験における D-module 内プラズマの電子密度およびその揺動の 3 次元空間分布取得を目指したマイクロ波イメージング干渉計用の受信アンテナアレイの開発を行っている。従来のミリ波アンテナアレイでは周波数変換のための局部発振周波数波 (L0 波) を観測波と同軸に空間的に照射供給するが、本研究ではアンテナアレイ各素子に実装したミリ波逡倍器を利用することで、L0 波光学系が不要、かつ取り扱いの容易な周波数帯の L0 信号をケーブル伝送することが可能な L0 内蔵型アンテナアレイを提案・開発している。今年度は昨年度実証試験に成功した本方式 2ch アンテナアレイを発展させた 8ch アンテナアレイを 2 台製作し、軸方向 8ch、径方向 2ch の合計 16 視線での計測を計画している。

## 7-4 電磁波を用いた先進的高温プラズマ計測手法の開発研究 徳沢季彦（NIFS）

### 資料 33-H27 フォーラム合同会合

核融合炉においても活用可能な計測手法の高温プラズマでの実証という観点で GAMMA10 プラズマを用いて行っている。今年度、ミリ波ドップラー反射計をインストールし初期実験結果を報告した。本システムは、ポートプラグ内の省デザイン化という観点から ITER の LFS への適用が計画されているモノスタティックなミリ波アンテナデザインを模擬したアンテナ光学系を実装した。またポロイダル速度勾配測定によるプラズマ最外殻の位置制御への適用可能性について検討することを視野に、リミター配位での径方向速度分布の実験データを取得した。

## 7-5 GAMMA 10/PDX における Thomson 散乱計測の進展 吉川正志（筑波大）

### 資料 34-H27 フォーラム合同会合

タンデムミラー-GAMMA 10/PDX では、電子温度の直接計測のために Thomson 散乱計測システムを導入してきた。これまでに空間 3 点、1 時刻の電子温度・密度計測ができるように改良してきた YAG トムソン散乱計測システムを、空間測定 5 点へ増加すると共に、1 ショットにおける多時刻計測が可能となるように改良し、電子温度、密度の径方向分布計測を 1 プラズマショットで調べること、及びダイバータ部のトムソン散乱計測システムの構築、さらにトムソン散乱信号増加のためのマルチパスシステムの構築を行ってきた。マルチパスシ

システムにおいては、大口径の偏光制御装置を使用することで改良を進め、4 パス Thomson 散乱信号までしか測定できていなかったものを6パス以上まで増やすことができた。

#### 7-6 筑波大におけるジャイロトロン開発 假家強（筑波大） 資料 35-H27 フォーラム合同会合

28GHz-1MW ジャイロトロンを九大 QUEST 装置に適用しプラズマパラメータの大幅な進展が得られた。

- ① GAMMA10、QUEST、Heliotron J、NSTX-U 用に 28GHz と 35GHz が発振可能な 2 周波数ジャイロトロンを開発中で、2016 年 3 月までに真空管試験を、2016 年 6 月頃には評価試験開始予定である。
- ② GAMMA10、QUEST 用に 14GHz ジャイロトロンの設計を行っている。
- ③ LHD 用 77GHz(3P)、154GHz(2P) ジャイロトロンを開発、プラズマ実験に適用することで LHD 実験に貢献している。次のステップとして 154GHz と 116GHz が発振可能な 2 周波数ジャイロトロンの設計を開始した。
- ④ JAEA と共同で DEMO 炉用 300GHz ジャイロトロンの開発を開始した。初期試験で 500kW を超える出力を得た。

#### 7-7 ダイバータ模擬実験に向けた ICRF による熱及び粒子束制御の進展 池添竜也（筑波大）

##### 資料 36-H27 フォーラム合同会合

GAMMA10/PDX で進めるダイバータ模擬実験に向けて、ICRF 加熱の運転スキームを従来の閉じ込め実験指向から変更し、端損失パラメータの拡張・制御に向けて最適化するための様々な実験を試行した結果について報告した。既存パワースourceを使用してこれまで最大の端損失粒子束 ( $\sim 1.7 \times 10^{23} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )、その磁力線方向イオン温度 ( $\sim 0.8 \text{ keV}$ ) を達成し、合わせてセントラル部の電子密度も従来の 2 倍を超える値 ( $\sim 4.5 \times 10^{18} \text{ mm}^{-3}$ ) での維持に成功した。さらに端損失粒子束を  $10^{24} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  へ近づける見通しについて実験事実を用いて示した。

#### 7-8 高性能磁場閉じ込めプラズマを目指した粒子補給法の研究 小林進二（京大）

##### 資料 37-H27 フォーラム合同会合

双方向型共同研究におけるセンター間連携研究として、筑波大学・京都大学双方で同一の研究課題名の元に進めている。GAMMA10 において新しい ICRF 加熱・粒子補給スキームを試し、今まで得られなかった運転領域で、線平均密度として  $3 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$  の高密度プラズマの生成に成功した。また超音速分子性ビーム入射(SMBI)による粒子補給の最適化を目指し、ラバールノズルの効果を検証するための基礎データを取得した。