

## [16]全国共同利用研究成果報告

<https://doi.org/10.15017/7170246>

---

出版情報：全国共同利用研究成果報告. 16, pp.1-321, 2013-03. Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University

バージョン：

権利関係：



平成24年度

核融合力学分野  
共同研究成果報告

## 特定研究 2: プラズマ乱流実験の大容量データからの物理情報抽出新手法の開発

応用力学研究所 伊藤 早苗

### 背景と目的

近年の実験技術の進展により、高精度時間サンプリング・空間多チャンネルでのデータの取得が普及し、プラズマ乱流実験をはじめ多くの科学技術分野で大容量のデータ処理が一般化している。これらのビッグデータを網羅的かつ効率的に処理し、知識を獲得する事が必要である。最も基本となるのは相関を持つ変数を発見する事である。この時、雑音成分の低減技術、統計精度向上技術、複数のデータ解析手法の統合、等が求められる。本特定研究では、PANTA 実験等から得られるプラズマ乱流のビッグデータから自明でない新たな物理情報を抽出する手法の開発を行う。

### サブテーマ

本特定研究では 10 のサブテーマが提案されている。またサブテーマリーダーが一堂に会する研究集会（稲垣）を開催した。

### 主要な成果

理論モデルをベースにした実験・解析手法の開発が行われた。プラズマ中の波動伝搬を基にした磁力線構造の観測法を開発し、磁力線構造が突発的に遷移する現象の発見につながった(居田)。プラズマ乱流構造に関しては、ストリーマ形成時のドリフト波の二次元断面構造の理論との比較(山田)、電子温度勾配モードと低周波数モードとの非線形結合の観測(金子)、高速イオン励起 GAM の同定(井戸)が進展した。電子熱輸送の状態評価のための確率論的手法の導入(田村)も試みられた。新たな計測器の開発に伴う実験・解析手法の開発も進展した。多チャンネルプローブ及び位相差の瞬時値解析が始まった(大島)。近年のマイクロ波技術の進歩により、先進反射計(徳沢)及びデジタル相関 ECE(土屋)の開発が進展し、信号からのプラズマ乱流揺動の抽出が議論された。PANTA において初めて乱流の高速度カメラ計測が行われた(大館)。このような揺動計測の発展に対応し、シミュレーションを用いたプラズマ乱流の時空間構造解析計測(糟谷)が進められている。

今後は、サブテーマ間の情報交換を更に活性化し、新たなアイデアの着想を促すとともにプラズマ乱流データ解析手法の検証及び統合を進める。



## 国際的学術拠点の形成報告書

## 「磁場閉じ込めプラズマ中の乱流、磁気島及び磁力線の研究」

## 高速度軟 X 線/VUV 光望遠鏡

ヘリオトロンタイプの核融合炉を成立させるためには、MHD 不安定な配位でプラズマを高ベータ化することが鍵となる。大型ヘリカル装置の磁場配位においては周辺プラズマは常に磁気丘であり、そこでの圧力駆動型の MHD 不安定性の振る舞いを調べる必要がある。この目的でプラズマ周辺部からの放射から周辺プラズマの揺動を 2 次元的に計測する高速度接線 VUV カメラを開発してきた。本カメラは多層膜反射鏡を使ってプラズマから放射される VUV 光を結像し MCP を使って増倍したのちに高速度カメラで計測するものである。これまでの開発で、周波数 2KHz までの揺動計測が可能となったが[1]、プラズマからの放射強度の不足からそれ以上の高速の計測はできなかった。昨年度より反射鏡の半径を 1.5 倍に大型化し、計測機器のプラズマへの距離も近づけることと合わせて 10kHz までの揺動計測をめざした改良を行ったが、MCP の故障で LHD の実験期間内で揺動計測を行うことができなかった。本報告では本年度に集中的に研究を行った、揺動計測以外の二つの応用例について報告を行う。

## (1) 炭素ペレットの侵入長推定[2]

大型ヘリカル装置では不純物輸送研究のために炭素ペレットの入射が行われている。炭素の輸送を詳しく調べるためには炭素の初期分布の推定が不可欠である。現在は炭素ペレットアブレーションクラウドからの  $H\alpha$  の放射時間と、ペレットの速度から侵入長が推定されている。しかし、ペレットの軌道が曲がる場合などには推定誤差が大きくなる問題があり、クロスチェックのための計測手法の開発が必要とされている。高速度 VUV カメラは炭素の水素様イオンからの放射を選択的に検出でき、ペレット入射直後の像から初期分布の推定が可能である。現在の LHD の輸送係数からすると、プラズマの輸送のタイムスケールより

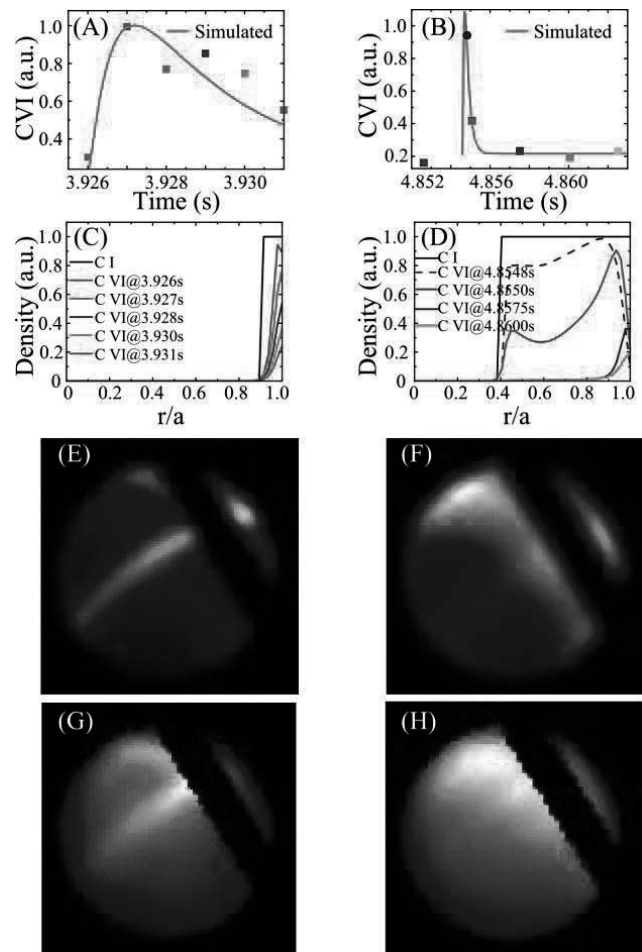


図1 ペレット入射直後の CVI イメージ(G), (H) と侵入長を仮定したモデルイメージ(E), (F)の比較

も炭素原子が水素様まで電離する時間の方が十分はやいため、炭素様イオンの放射強度分布を推定できれば、入射した炭素の初期分布を推定することができる。実際には侵入長をパラメータとして、電離・輸送のシミュレーションを行ったうえで接線像のシミュレーションを行い、観測像との比較を行っている（図1）。本推定法と、 $H\alpha$  光の放射時間から推定したものの比較を図2に示すが、誤差の範囲内でよく一致している。

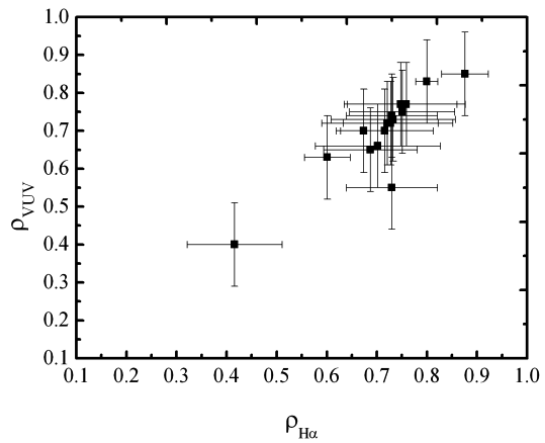


図2 炭素ペレットの侵入長の VUV カメラによる推定値と、 $H\alpha$  計測による推定の比較

## (2) 電子温度摂動の2次元分布の推定手法の開発

大型ヘリカル装置では、電子サイクロトロン加熱のモジュレーションから作られるヒートパルスの伝搬特性を計測することで、磁場垂直方向の輸送を推定している。磁場がストキャスティック化した領域で輸送が大きくなることを利用して、ストキャスティック領域の検出を逆行することができる。接線 VUV カメラは基本的には密度揺動の計測ではあるが、温度揺動に対しても若干の感度がある。それは電子温度変化に対して炭素イオンの電離度が変化するためであり、図3に示すように、プラズマのほとんどの領域で電子温度摂動に対して負の相関をもち、イオン化エネルギーに近い 100eV 付近では特に感度が良い。イオンの電離時間から考えると、数 ms 程度のタイムスケールの電子温度摂動の検出は十分可能であって、プラズマ周辺領域の磁場構造の変化を調べるツールとして使える可能性がある。実験でも電子温度摂動と逆位相の振動が検出されている。実験時に検出された揺動の振幅とその位相差を図4に示す。振幅が視野下部で大きくなることは、図3に示すように、

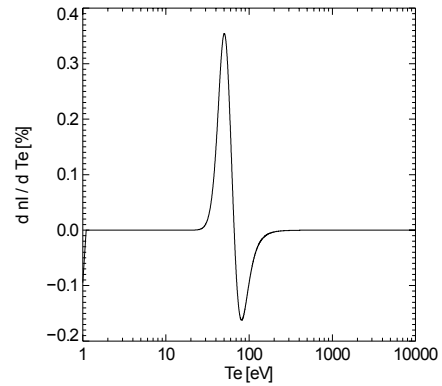


図3 電子温度摂動に対する放射強度の変化を電子温度の関数で示す。

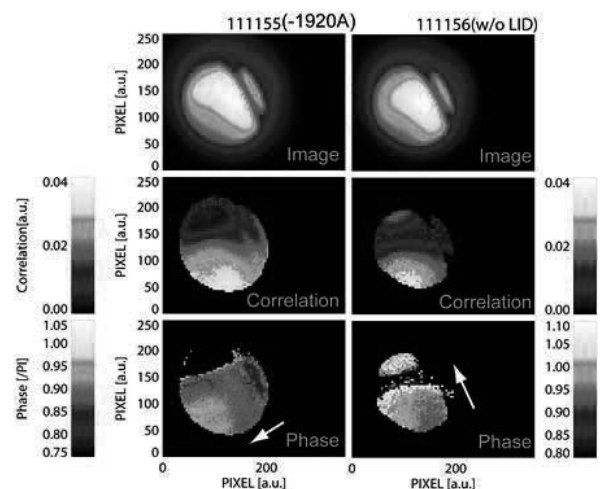


図4 熱パルス伝搬実験で観測される CVI イメージ（上段）、摂動の振幅（中段）、摂動の位相（下段）を示す。左列のデータは  $m/n = 1/1$  の磁気島を生成していた状態で取得した。

100eV 付近で電子温度摂動への感度が大きくなることと矛盾しないが、位相分布は大型ヘリカル装置の磁気面形状が複雑であるため、現在はいま再構成することができていない。より単純な磁場配位を持つトカマク装置においては2次元位相分布が求められる可能性がある。また大型ヘリカル装置で位相情報を再構成できるような視野が可能かどうかを今後検討していく予定である。

## 論文リスト

- [1] Ming, T.F., Ohdachi, S., Sakakibara, S., Suzuki, Y., 2012. “High speed vacuum ultraviolet telescope system for edge fluctuation measurement in the large helical device.” *Review of Scientific Instruments* 83, 10E513 –10E513–3.
  
- [2] Ming. T. F. S. Ohdachi. S., Suzuki. Y. LHD Experiment Group “Estimate of the deposition profile of carbon pellet using a high speed VUV imaging system in LHD”, Submitted to *Plasma Sci. Tech.*
  
- [3] DU, X., OHDACHI, S., TOI, K., others, 2012. “Development of an Array System of Soft X-ray Detectors with Large Sensitive Area on the Large Helical Device”. *Plasma and Fusion Research* 7, 2401088.



## マイクロ波計測器信号からの乱流揺動信号抽出法の研究

核融合科学研究所・ヘリカル研究部 徳沢季彦

## 1. 目的

核融合発電を目指す高温プラズマ閉じ込め研究において、乱流物理研究は現在最重要研究課題である。これまで、高温プラズマ中の乱流を計測する手段が非常に限られていたが、近年新しい非接触な計測手法としてマイクロ波を用いた乱流揺動計測法が開発・適用されるようになってきた。計測器システムに新しい素子技術が活用できるようになったことだけでなく、新しい解析手法が開発されてきたことによって世界各国の実験に適用されてきている。本研究では、ハードウェアとして新しく開発を進めている空間多点計測システムの構築と、それによって得られる詳細な空間構造を求めることをまず当初の目標とし、この計測システムをプラズマ実験へ適用することによって得られる大規模データに対して、開発が進んできたデジタル信号処理手法を駆使し、乱流信号を抽出する技術開発を行い、プラズマ乱流物理への知見を得ることを最終目的とする。

## 2. 計画と実験方法

まず、空間多点を同時に観測し、乱流の構造・物理を知るために、情報通信分野において開発適用が行われてきている周波数コムを発振源とする新型多チャンネルマイクロ波コム反射計の構築を行う。そして、この計測システムを核融合科学研究所の大型ヘリカル装置(LHD)プラズマへ設置し密度揺動およびそのポロイダル回転分布の計測に適用する。また、乱流輸送において、温度揺動に関する知見が得られると期待されている新しい計測手法である correlation ECE (cECE) システムの構築とそのLHDプラズマへの適用による電子温度揺動計測データも取得し、これら大容量データに含まれる雑音成分から乱流揺動信号を、効率的かつ高精度で抽出する技術手法を確立することを目指した研究を行う。

## 3. 実験結果

周波数コムを用いた  $ka$ -band マイクロ波反射計をLHD装置に設置しプラズマ実験に適用した結果の一例を図1に示す。この時送受信アンテナの角度を調整することによって、プラズマ周辺部からの波数約  $10\text{cm}^{-1}$  の密度揺動による後方散乱波を観測している。図はコム発振している各周波数成分のプラズマからの散乱波スペクトルを表示しているが、密度揺動によるスペクトルの拡がり、およびプラズマ回

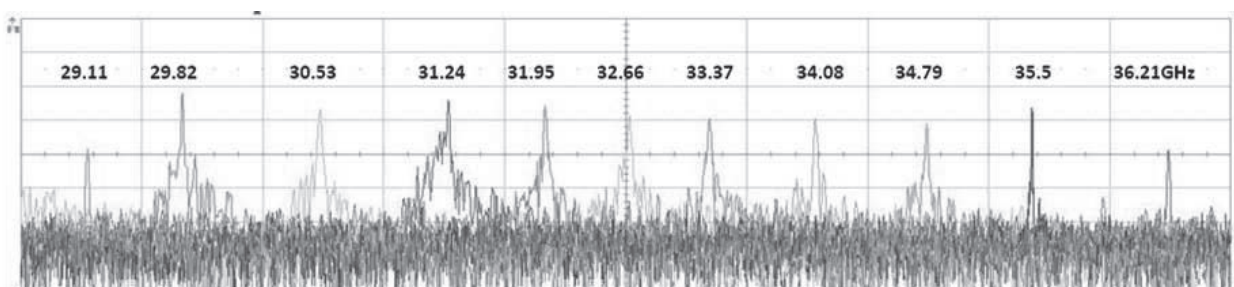


図 1. Comb ドップラー反射波の周波数スペクトル(1MHz/div;重ね表示)

転によるドップラーシフトが生じていることが見て取れる。このデータはサンプリングレート 20GS/s という非常に高速かつ高帯域なオシロスコープを用いて全散乱波波動を直接取得した大容量データを処理したものであるが、図のように其々の成分毎に問題なく弁別して処理できることが分かった。これは世界初の実証結果であり、論文化の準備を進めている。一方、フィルタバンクを用いて、周波数コム毎に個別にデータを収集するシステムも同時に開発して稼働させた。図 2 に示すのは、各周波数成分毎（すなわち異なる空間位置を意味する）の密度揺動成分のドップラーシフトの時間変化である。このドップラーシフト量  $f_D$  はポロイダル速度  $v_{\perp}$  と  $f_D \approx -k_{\perp} v_{\perp}$  という関係性を持つ。このデータは半径方向電場を制御することを目的とした実験で取得したものであるが、時間的にポロイダル速度の大きさ及びその位置が変動している様子を観測することに成功した。

また、データ処理に関して、図 3 に示すように、信号に含まれる密度揺動成分を揺動周波数成分毎に弁別し、かつそのエンベロープ

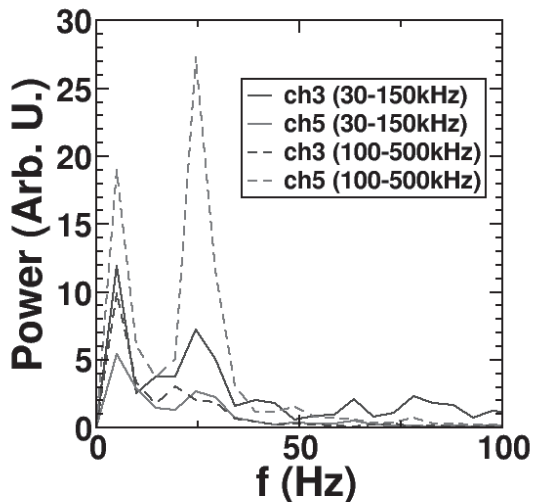


図 3 : エンベロープ解析と Conditional averaging の技法を適用した密度揺動の周波数成分毎の周波数スペクトル

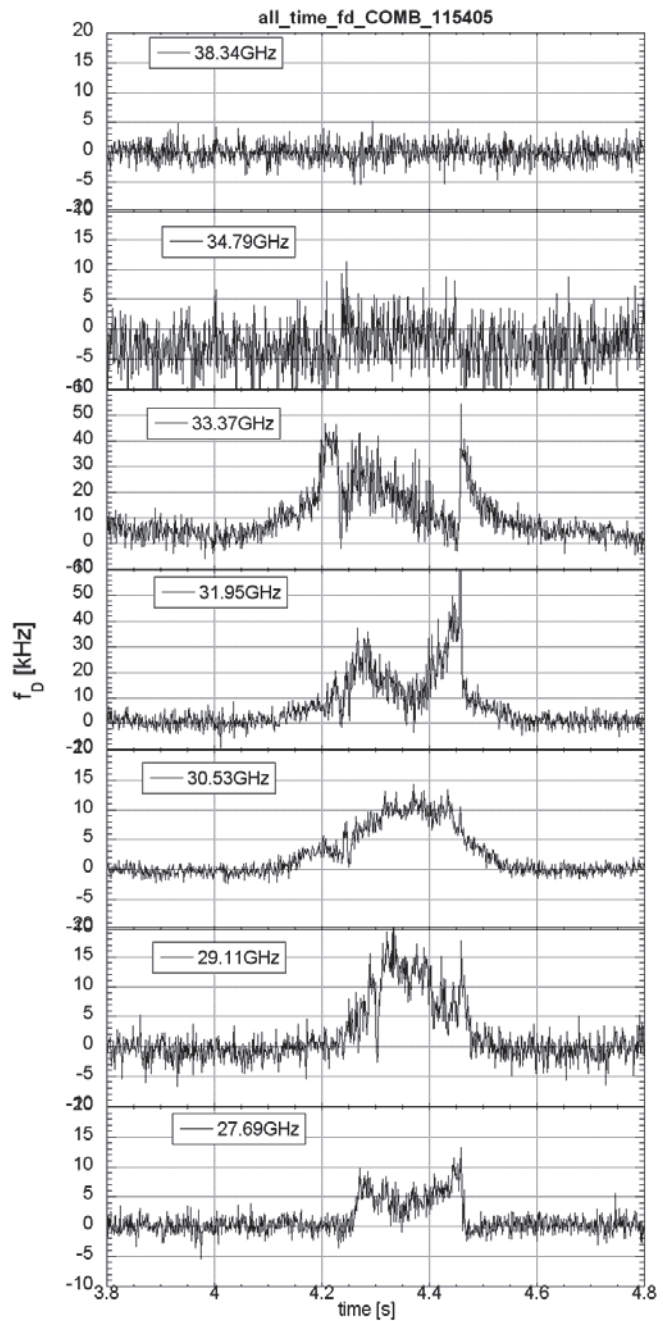


図 2 : 各周波数成分のドップラーシフト（ポロイダル速度に比例）の時間変化。

の周波数スペクトルを S/N 比を高めて取得することを目指した Conditional averaging 技法の適用なども実施した。図のように変調した 25Hz の周期を明確にとらえることが出来た。今後より詳細にこれらの技法の確立を目指して研究を進める。

## デジタルコリレーション ECE の開発

核融合科学研究所 土屋 隼人

## 1. 背景と目的

磁化プラズマ中において乱流は輸送において大きな影響があることは広く認識されているが、乱流そのものの構造を理論的・実験的に理解することは極めて重要な課題である。装置サイズ程度の大きな構造の研究については実験的に近年報告があるが、イオンラーマー半径の数倍の乱流についての実験研究は構造や輸送を議論できるほどの計測が乏しいために十分でない。小さな乱流構造を捉えることができる計測を充実させ、マイクロ、メゾ、マクロスケールの乱流の非線形結合の理解を実験的に行うことが望まれている。

そこで、本研究の目的は、メゾスケール乱流計測に対応しうる高時間分解能かつ高空間分解能を持つ計測のデジタルコリレーション ECE を提案し、その手法の検証とした。

## 2. デジタルコリレーション ECE のコンセプト

磁化プラズマにおいて、マイクロ波計測の一つである電子サイクロトロン放射 (ECE) 計測はプラズマを乱さず電子温度の局所計測ができる有用な計測手法である。しかしながら背景ノイズや機器に由来するノイズが多いのが難点であり、原理的にも局所的な高周波揺動は感度限界が存在する。そこで、近年、ノイズ低減の手法として、2点間の温度揺動の相関をとることでプラズマ由来の信号を取り出すコリレーション ECE (CECE) が広まりつつあるが、従来以上の多チャンネル計測になりデータ解析の煩雑性が増している。

一方、電子デバイスの進歩によりデータ収集装置の高速化が目覚ましく、ECE の周波数帯 (RF:  $\sim 100$  GHz) からヘテロダイン検波を行った中間周波数帯 (IF:  $\sim$  数 GHz) を直接デジタル化することが可能となった。そこで、従来のマルチチャンネル型の CECE を IF のデジタル化データで再現する手法を「デジタルコリレーション ECE」(DCECE) として提案する。この手法の最大の利点は、観測対象の構造の大きさ、周波数、揺動強度に応じて、解析する段階で計測パラメータを設定できる点にある。従来の CECE では空間分解能はハードウェアの周波数フィルタの設定に依存するため、空間分解能を変更することは容易ではないが、DCECE では数値計算で行うため可能である。また、図 1 に DCECE のハードウェアのブロック図を示すように取得データ自体は単一チャンネルとなるのでハードウェアが容易になることも利点としてあげられる。

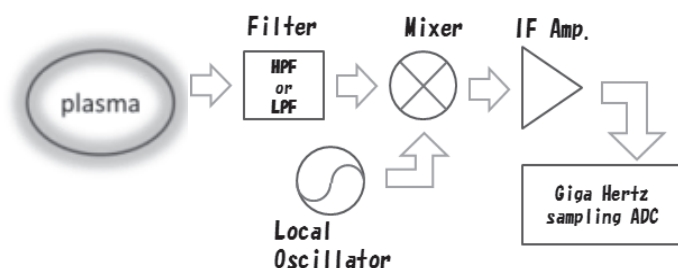


図 1 DCECE ハードウェア

### 3. DCECE 解析手法

図2にDCECEの解析フローチャートを示す。図では100kHzの電子揺動にノイズを加えた模擬データを例にしている。解析手順はまず、IF信号  $x(t)$  (図2 (a)) に対してフーリエ解析を行う。そのパワースペクトルは電子温度に比例する。FFTを時間軸に対して、多数回を行い、電子温度発展を得る (b)。(b)の縦軸の周波数はプラズマ計測としては大半径方向  $R$  に相当する。離散化フーリエ変換の誤差の影響を減らすため、ある幅をもった周波数領域で平均操作を行う必要がある (c)。この周波数幅が径方向の空間分解能を決めるが、ECEの感度限界と関係するため極端な小さな幅をとることはできないが、計測対象の現象に応じて任意の空間分解能を選ぶことができる。平均操作をすることによってマルチチャンネルの電子揺動データを得たので、FFT操作により各チャンネルの電子温度のスペクトルを得る。さらにノイズ低減のために、あるチャンネルを基準点としたクロススペクトル  $S^{Te}(t_w, R, f)$  を時間領域で平均した  $\langle S^{Te}(R, f) \rangle$  (e) を得る。 $\langle S^{Te} \rangle$  の位相より伝搬速度や、 $\langle S^{Te} \rangle$  のフーリエ逆変換の行うことでコリレーション  $C(R, \tau)$  を算出し、相関長などを得ることができる。

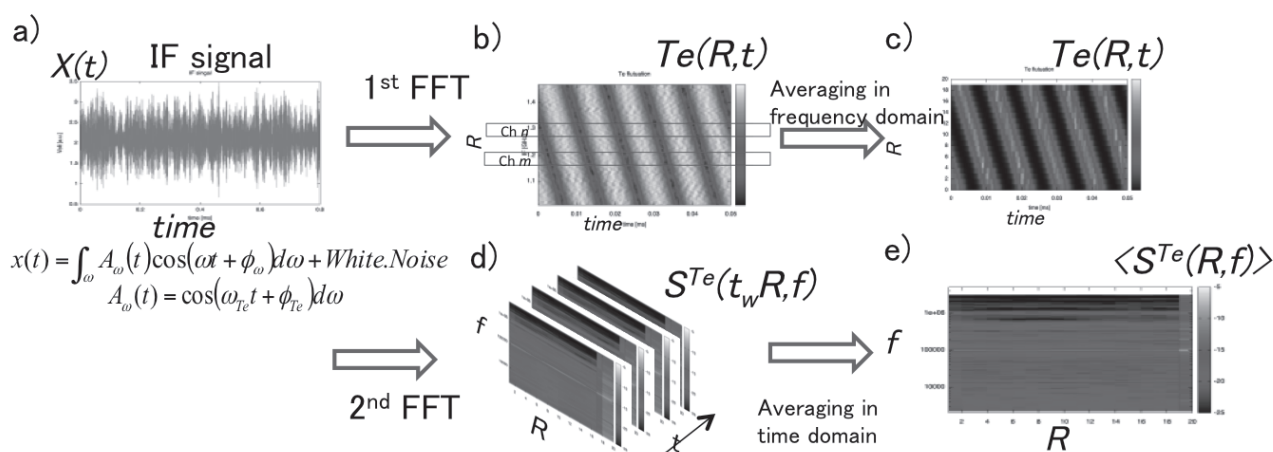


図2. DCECEの解析フローチャート

### 4. LHD データ解析

核融合科学研究所 (岐阜県) にある大型ヘリカル装置 (LHD) において、試験的に 77~82 GHz の ECE 信号を 77 GHz の局部発振器を用いてダウンコンバートした IF 信号を高速デジタル化 (NI-PXIE 5186, National Instruments 社製, バンド幅 5GHz, サンプリングレート 12.5GHz, データ取得時間 40msec) にて取得した。図3に示すように、IF 信号のスペクトル解析より 6 mm 離れた 2点間の温度揺動を再構成することができた。

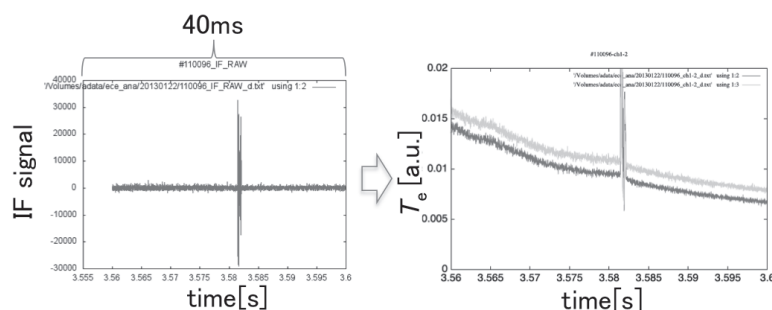


図3. 実データの電子温度再構成

## 24 特 2-4

### 波動伝搬を用いた磁力線構造観測法の開発

核融合科学研究所 へリカル研究部 居田克巳

#### 目的

磁気面のストキャスティック化は周辺プラズマの制御やコアプラズマの閉じ込めに重要な役割を演じる。プラズマによる磁気面の統計化の発生の原因とプラズマ閉じ込めへの影響を明らかにするため、磁力線構造の観測手法の開発を行う。本研究を通じて開発された波動伝搬解析手法の応用が、磁力線の可視化手法として確立されつつある。本手法の更なる高度化には、開いた磁力線構造での波動伝搬の理解が必要となり、応用力学研究所の直線装置 PANTA を用いた実験研究に応用する事を目的としている。

#### 実験方法

プラズマ中に熱波動を励起し、その伝搬特性により磁力線構造を推定する方法を提案し、開発を進める。本手法を更に発展させ、磁力線構造変化のダイナミクスの観測と統計化推定の精度を向上する。熱波動の wavelet 解析を基盤とし、コンディショナル平均法等を組み合わせる。LHD の実験データや PANTA での開いた磁力線構造におけるプローブデータを用いて解析手法の検証を行い、信頼性を向上させる。

#### 実験結果

加熱パワーをモジュレーションすることでプラズマ中に熱波動を伝搬させた実験を行った。その時の電子温度とモジュレーション振幅の2乗の時間変化を図1に示す。時刻  $t=4.3\text{s}$  において中性粒子ビームの入射方向を等価電流方向から反等価電流方向に入れ替えた。周辺部の回転変換角度が減少、中心部の回転変換角度が増加することで磁気シアが弱くなる。磁気シアが 0.5 程度まで減少した時に電子温度の平坦化が起こる。この時にモジュレーション振幅の2乗の時間変化をみると、中心部で振幅が減少、周辺部で振幅が増加している。

図2は磁気シアの変化量を変えたプラ

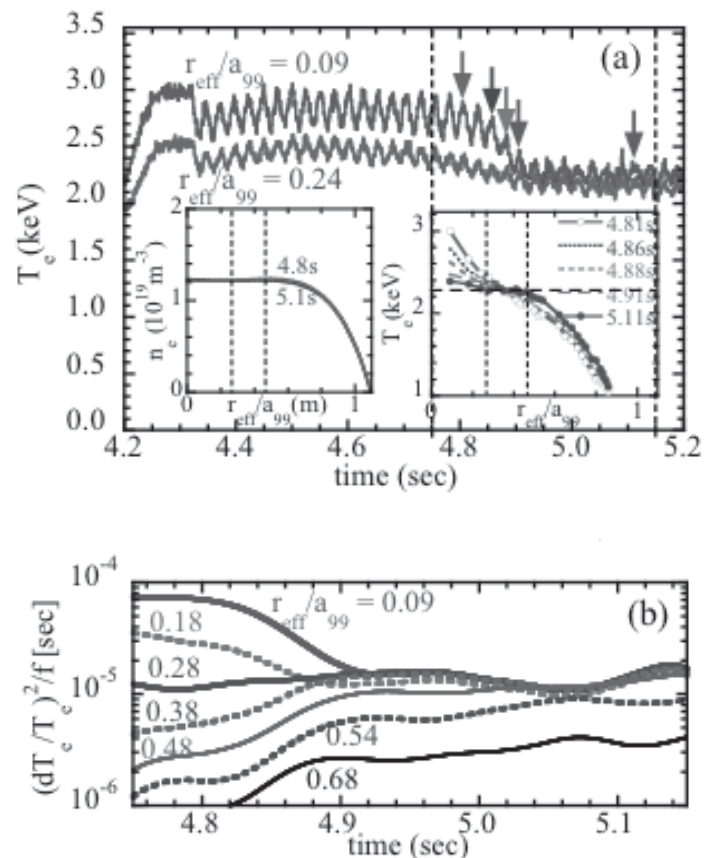


図1 電子温度とモジュレーション振幅の2乗の時間変化

ズマにおける熱波動伝搬の位相の遅れの空間分布であるが、位相の遅れの空間分布に2つのパターンが観測された。磁気シアを速く減少させた場合には、山形の位相の遅れの空間分布が得られ、プラズマ内部に磁気島ができていたことを示している。一方の磁気シアを遅く減少させた場合には、位相の遅れの空間分布に平坦部が現れ、プラズマ内部にストキャスティック領域ができていたことを示している。

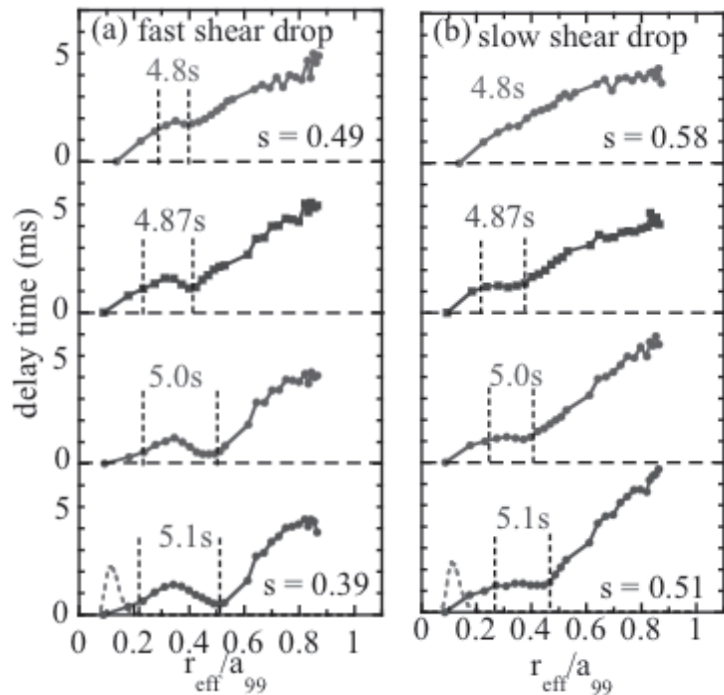


図2 磁気シアの変化量を変えた時の熱波動伝搬の位相の遅れの空間分布

### 考察

熱波動伝搬の位相の遅れの空間分布から、磁場のトポロジーを推定できる事が実験的に確かめられた。この「波動伝搬を用いた磁力線構造観測法」は磁力線が閉じているプラズマコア部だけではなく、磁力線が開いているプラズマ周辺部や、直線磁場装置のプラズマにも応用が可能で、今後の発展が期待される。

### 研究成果報告

本研究で開発した手法により磁力線構造を推定し、構造間の分岐現象を発見した。本成果は既に以下の共著論文として出版した。

K.Ida, S.Inagaki, Y.Suzuki, S.Sakakibara, T.Kobayashi, K.Itoh, H.Tsuchiya, C.Suzuki, M.Yoshinuma, Y.Narushima, M.Yokoyama, A.Shimizu, S-I.Itoh and the LHD Experiment Group, "Topology bifurcation of a magnetic flux surface in magnetized plasmas", New Journal of Physics 15 (2013) 013061

さらに分岐現象に伴いプラズマの流れが変化する事を見出し、以下の学会発表を行った。

居田克巳、永岡賢一、吉沼幹朗「ストキャスティック磁場領域におけるイオンの熱と運動量の輸送」プラズマ・核融合学会 第29回年会、クローバープラザ、福岡県春日市、2012年11月27日(火)～30日(金)

### 研究組織

居田克巳 核融合科学研究所  
 稲垣滋 九州大学応用力学研究所  
 小林達也 九州大学・総合理工学部

## 24 特 2-5

### プラズマ乱流データ解析研究会

応用力学研究所 稲垣 滋

本研究は「特定研究 2: プラズマ乱流実験の大容量データからの物理情報抽出新手法の開発」における個別課題の成果の統合を議論する。

#### 目的と背景

様々なプラズマ乱流データを対象とし、共通な物理機構を抽出する一連の手法の確立を目指す。特定研究 2 で議論する手法は、ビッグデータの処理法、偽相関の排除法、変数間の相関の検出、理論的なモデリング、シミュレーションによる予測、等非常に多岐に渡る。多方面からの研究者が一堂に会して議論し、個別のアプローチを統合することで、本手法の開発に新たな展開がもたらされることが期待できる。本特定研究で取り組む課題はプラズマ乱流に限らず、多くの先端科学における共通の課題であり、応用力学研究所の共同研究として遂行し先導する事が必要である。

#### 研究集会の開催

2013 年 1 月 29 日に応用力学研究所 2F 会議室において研究会を開催した。研究会のプログラムを添付する。

#### 予算の執行

予算は研究会参加の旅費に執行した。

#### 研究集会のまとめ

技術論：データ解析を行う際、ノイズによる偽相関には注意する必要がある。バイスペクトル解析等では値の収束を観測する事が慣習となっている。今回はそれに加えてデジタル的にノイズを落とす処理である適応デジタルフィルタについての紹介があった。

統合化：今年度の個別テーマは以下のように 3 つにカテゴリー分けすることができる。

#### 1. 理論モデルをベースにした実験・解析手法の開発

- ・磁力線構造の観測と磁力線構造遷移の理論モデルとの比較

- ・帯状流理論を基にした帯状流検出法の開発
  - ・帯状流及びストリーマ理論を基にした帯状流・ストリーマ検出法の開発
  - ・ドリフト波の非線形理論を基にした電子温度勾配モードと低周波数モードとの非線形結合の観測
  - ・電子熱輸送の状態評価のための確率論的手法の導入
2. 新たな計測器の開発に伴う実験・解析手法の開発
- ・多チャンネルプローブ開発及びそのデータ解析法(Hilvert 変換)
  - ・先進マイクロ波反射計の開発とその信号からのプラズマ乱流揺動信号の抽出
  - ・デジタル相関 ECE の開発
  - ・高速度カメラ計測データの処理
3. シミュレーションとの連携
- ・プラズマ乱流の過渡応答シミュレーション
  - ・シミュレーションを用いたプラズマ乱流の時空間構造解析

今回は研究課題間の相互理解がはかられた。特にプラズマ乱流解析ではバイスペクトル解析等共通のツールを使っているが適用する問題によりノウハウが異なる。これらの情報を交換できた事は大きな成果である。また、近年のマイクロ波技術の進展により、伝統的な反射計が大きく進化している。これら計測器の進展をふまえ、シミュレーションによる計測機器の模擬のターゲットとして反射計を選択した。次回からは課題間での交流が深化する事で統合化に向けた研究が一層進捗すると期待される。

議論:デジタル相関 ECE の開発に関して、ビッグデータの並列計算について報告された。通常の時系列解析ツールである FFT では計算時間が膨大になり、実験へのフィードバックが不可能になる。そこで 並列計算の必要性が議論され、更に将来的には FPGA(field programmable gate array)等により、ハードウェア的に計算する事も視野に入れる事が提案された。

今後の予定

個別課題間の統合を更に進める。ノイズや偽相関の除去に関して、統計の専門家に研究協力者として参加してもらおうと共に、FPGA の導入等についても研究協力者を開拓する。

時間的、空間的に分解能の高い揺動計測法が確立してきた現在、大容量のデータを効率的に処理し、知識を獲得する事が必須である。乱流シミュレーションで得られる3次元時系列データに対して数値解析を行うことで、実験データ解析に活用できる手法の開発を行うことができる[1]。そこで本研究では円筒形直線型プラズマにおけるドリフト波乱流の数値シミュレーションを通じて、プラズマ乱流の時空間構造解析手法の成熟を図ることを目的とする。シミュレーションで形成される構造をダイナミクスも含めて数値計測し、その時間的空間的構造がいかに実験で観測され得るかを提示する。具体的な解析対象は応用力学研究所の直線型装置 PANTA であり、本年度は以下の2つの課題に取り組んだ。ひとつは抵抗性ドリフト波乱流の長時間データを用いた乱流駆動粒子束等の乱雑成分の確率統計的振る舞いの解析で、もうひとつは PANTA 装置でのイオン温度勾配(ITG)モード励起条件の評価である。

まず抵抗性ドリフト波乱流の長時間データを用いた乱流駆動粒子束等の乱雑成分の確率統計的振る舞いの解析について述べる。乱流状態にあるプラズマでは大自由度のダイナミクスが発達している。1つのフーリエ成分は、多数の成分の非線形結合により非線形力を受ける。非線形力は、乱雑な成分を持ち、その効果を取り入れたプラズマ乱流統計理論が進展を見せている[2]。揺動の乱雑成分に関する確率密度分布(PDF)の詳細な実験観測も始まっている[3]。そこで、本研究では、乱流シミュレーションを行い、得られた乱流場データの揺動や乱流駆動粒子束等の高次モーメントにおける乱雑成分の確率統計的振る舞いを解析した[4]。Numerical Linear Device (NLD) は円筒形直線型プラズマにおける抵抗性ドリフト波乱流を模擬する計算コードである[5]。定常的な粒子ソース項を与えたシミュレーションで乱流構造形成を伴う非線形飽和状態を得ている。その3次元乱流場の長時間データを用い、乱流揺動の統計性を解析した。イオン-中性粒子衝突周波数が小さい場合に帯状流が形成される。そのような飽和状態においてイオンサイクロトロン周期の60000倍以上、特徴的ドリフト波周期の1000倍以上の時間にわたる時系列データの解析を行った。統計量の収束を得るためには十分多くのサンプル数が必要となり、今回用いたデータ数で物理量の収束が見られた。粒子や運動量のダイナミックな釣り合いを評価するために、乱流粒子束やレイノルズ応力の半径方向分布を計算した。PDFのバルク部で半径位置によって差は小さく、テール部で形状に差がみられるが、それらが有意なものかは今後の解析が必要である。モデルの釣り合いの式の中に複数の非線形項が含まれる。渦度の釣り合いにおいて、レイノルズ応力項と磁力線方向非線形項の二項が、同等の大きさを持つが、渦度の時間変化との相関はレイノルズ応力とのみ大きいことが分かった。複数の非線形項の中でも変動のダイナミクスを規定しているものが存在していることを示す。さらに粒子束と運動量束の時間的相互関係を見た。粒子束の変化は運動量束の変化に対して、典型的ドリフト波周期の0.4倍の時間先行していた。その時間遅れを考慮してプロットした結合PDFが図1であり、等高線が楕円形に引き伸ばされた様子が両者の相関関係を表している。このように乱流シミュレーションデータを用いてダイナミックな構造形成機構の検定手法の開発を進めた。

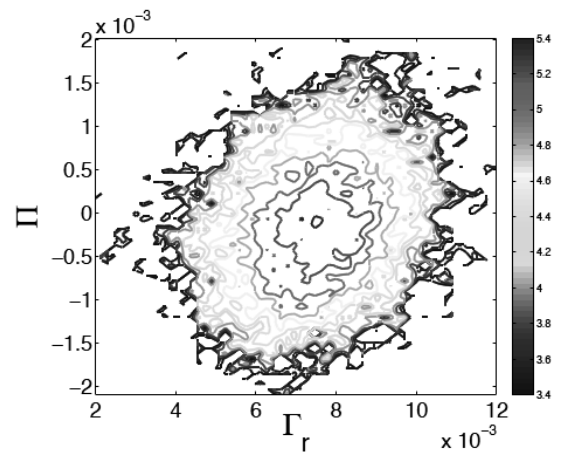


図 1: 粒子束 $\Gamma_r$ とレイノルズ応力 $\Pi$ の結合PDF。

次に直線装置 PANTA での ITG モード励起条件の評価について述べる。イオンエネルギーの異常輸送を引き起こす ITG 乱流の特性を理解することは核融合炉実現のために重要である[6]。PANTA ではこれまで前述のような抵抗性ドリフト波乱流の研究が精力的になされてきた。Ion Sensitive Probe を用いたイオン温度測定も進展してきたことからイオンの運動性によって生じる不安定性である ITG モードの観測を計画している。その第一段階として、流体モデルを用いた数値解析による ITG モードの線形成長率の評価を行った[7]。ここでは軸方向一定の成分のみを持つ磁場中の円筒プラズマを取り扱う。解析に用いるモデル流体方程式は、イオンの連続の式と運動量保存の式、エネルギー保存の式から成る Hamaguchi-Horton 方程式[8] を拡張したもので、衝突の影響を考慮してイオンと中性粒子の衝突項と粘性項を取り入れている。径方向の境界条件としては円筒プラズマの中心と端で波の振幅が 0 とする。また背景密度、温度の径方向分布は  $N(r) = N_0 \exp[-(r/L_N)^2]$ ,  $T_i(r) = T_{i0} \exp[-(r/L_{Ti})^2]$  とする。PANTA ではヘリコン波によるアルゴン放電で高密度プラズマを得ている。典型的なパラメータは電子温度  $T_e = 3\text{eV}$ , イオン温度  $T_i = 0.3\text{eV}$ , 密度  $n_{i0} = 10 \times 10^{19}\text{m}^{-3}$ , 磁場  $B = 0.04\text{T}$ , 装置長  $\lambda = 4\text{m}$ , プラズマ半径  $a = 50\text{mm}$ , 密度勾配長  $L_N = 50\text{mm}$ , 温度勾配長  $L_{Ti} = 250\text{mm}$  である。PANTA プラズマのパラメータ領域で方位角方向と軸方向のモード数  $(m, n)$  に対する線形成長率の依存性を見ると  $(m, n) = (2, 2)$  モードが最も不安定となり、モード数が大きい場合または  $(m, n) = (1, 1)$  の場合は安定となった。さらにパラメータ(磁場  $B$ , 装置長  $\lambda$ , 勾配長  $L_N, L_{Ti}$ , 温度  $T_i, T_e$ ) に対する線形成長率の依存性を調べた。図 2 は勾配長に対する線形成長率の依存性を示している。×印は PANTA 実験における典型的なパラメータである。不安定になる勾配長のパラメータ領域は限定的で、密度勾配に対する依存性が強いことがわかった。また磁場に関する依存性を見ると、磁場が弱いときは方位角方向のモード数が小さいモード、磁場が強いときはモード数が大きいモードが不安定化している。このような数値解析の結果、PANTA の典型的なパラメータで ITG モードが励起される可能性があることがわかった。今後実験との比較とともに乱流シミュレーションを行い、乱流構造形成に果たす役割について研究を進める。

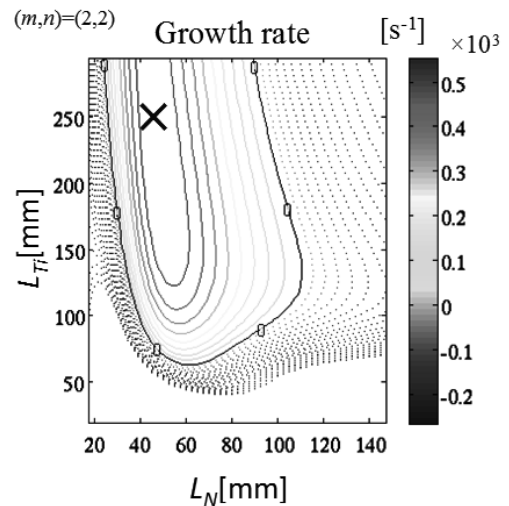


図 2: 温度勾配長  $L_{Ti}$ 、密度勾配長  $L_N$  に対する線形成長率の依存性

これら初期的な結果を進展させ、さらに実験結果との比較を行うことで、乱流構造形成のダイナミクス検定手法の確立を進める。さらにはこの手法を用いてプラズマ乱流における構造形成機構の物理的理解につなげる。

#### 参考文献

- [1] N. Kasuya, *et al.*, J. Plasma Fusion Res. **88**, 322 (2012)
- [2] A. Yoshizawa, *et al.*, Plasma and Fluid Turbulence: Theory and Modelling (IoP, Bristol, 2002)
- [3] Y. Nagashima, *et al.*, Phys. Plasmas **18**, 070701 (2011)
- [4] M. Sasaki, *et al.*, Int. Toki Conf. 22 (2012, Toki, Japan) P2-8
- [5] N. Kasuya, *et al.*, Phys. Plasmas **15**, 052302 (2008)
- [6] W. Horton, Rev. Mod. Phys. **71**, 735 (1999)
- [7] Y. Miwa, *et al.*, Int. Toki Conf. 22 (2012, Toki, Japan) P4-23
- [8] S. Hamaguchi and W. Horton, Phys. Fluids B **2**, 1833 (1990)

## 1. 背景と目的

簡便、安価でありながら高時空間分解能を有する静電プローブ計測器は、プラズマの乱流研究において大きな役割を果たしてきた。直線型装置（例えば PANTA 等）では、多点プローブ計測によりプラズマ乱流の時空間構造の観測に用いられ、乱流による自発的な構造形成の発見などの成功している。一方、トカマク及びヘリカル等のトラス型装置においては、設置ポートの制限やプラズマの熱負荷の問題からプローブ構造の自由度が少なく、乱流の物理描像の解明に必要な諸量を計測する為には、目的に応じて最適なプローブ設計を進める必要がある。

京都大学のヘリオトロン J 装置においては、周辺の乱流と輸送の関係を明らかにするべく、静電プローブを用いて周辺プラズマの実験的研究が進められてきた。最近、高速イオン励起不安定性が周辺部に存在する揺動やポテンシャル構造に対して影響を与えていることが見出された。高速イオンとプラズマの相互作用によって励起される高速イオン励起不安定性は、高速イオン損失によるプラズマ閉じ込め特性の悪化、或いは壁への損傷を与えるという観点からこれまで研究されてきたが、それに加え乱流やポテンシャル構造に影響を与えることでバルクのプラズマの閉じ込め特性に影響を与えるという観点を今後導入し実験的に検証を進めていくことが重要である。

本研究では、プローブ計測に精通した応用力学研究所の研究者らと共同で、トラス装置であるヘリオトロン J 装置に適用可能、且つ乱流研究に適したコンパクトなプローブ構造について検討を進める。また、予期される取得データの解析手法についても検討を進める。これは、プローブ計測器のノウハウから、大規模データ取得、スペクトル解析といった多方面の研究アプローチを統合することで初めて可能になるものであり、応用力学研究所の共同研究として遂行することによって、プラズマ乱流研究や核融合プラズマ研究に新たな展開がもたらされることが期待できる。また、実際に開発したプローブをヘリオトロン J 装置に適用し、高速イオン励起不安定性の発現時の周辺プラズマの構造、揺動特性、高速イオン損失について明らかにする。最近導入された Beam Emission Spectroscopy (BES) 計測器などのプラズマ内部揺動が検出可能な計測器を併用し、内部と周辺部の構造変化を同時に解明する。

## 2. 実験と結果

ヘリオトロン J 装置では、現在異なるトロイダルセクションに四組の周辺計測用静電プローブを有している。本研究では、揺動の構造・特性を詳細に調べる為、径方向アレイプローブ（図 1 (a)）、磁気プローブ内臓プローブ（図 1(b)）、ポロイダルアレイプローブ（図 1(c)）の三種のプローブを周辺揺動計測に用いた。今回、径方向アレイプローブを新たに設計・導入している。プローブのヘッド部は、高温プラズマからの熱負荷に備えるために熱負荷・熱衝撃性に強いボロンナイトライドとカーボンから基本的に構成されているが、新規導入した径方向アレイプローブに関しては、堅牢化の為に金属(Mo)で基本的に支持し、熱負荷に耐えるためカーボン、モリブデン、ボロンナイトライドから構成している。

実験は、線平均密度  $1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$  の比較的低密度の中性粒子ビーム加熱プラズマをターゲットとして、上述したプローブを用いて最外殻磁気面周辺の揺動計測を行った。この時、60-80kHz に高調波を伴う高速イオン励起不安定性 MHD バーストが観測された。このモードは、ヘリオトロン J における NBI 加熱プラ

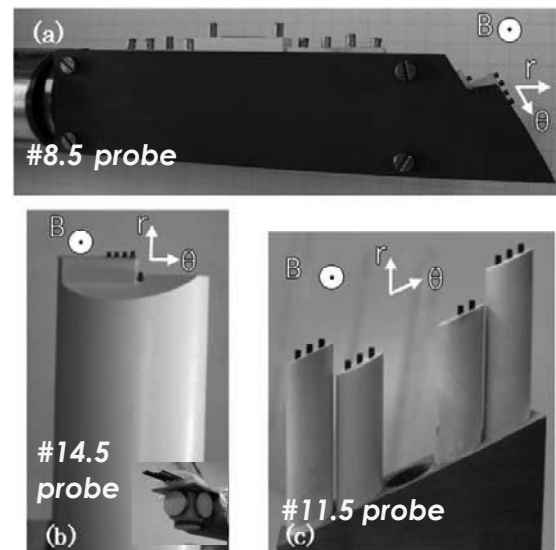


図 1. 実験に用いた(a)#8.5、(b) #14.5、(c) #11.5 セクションの位置に設置されたプローブヘッドの写真。

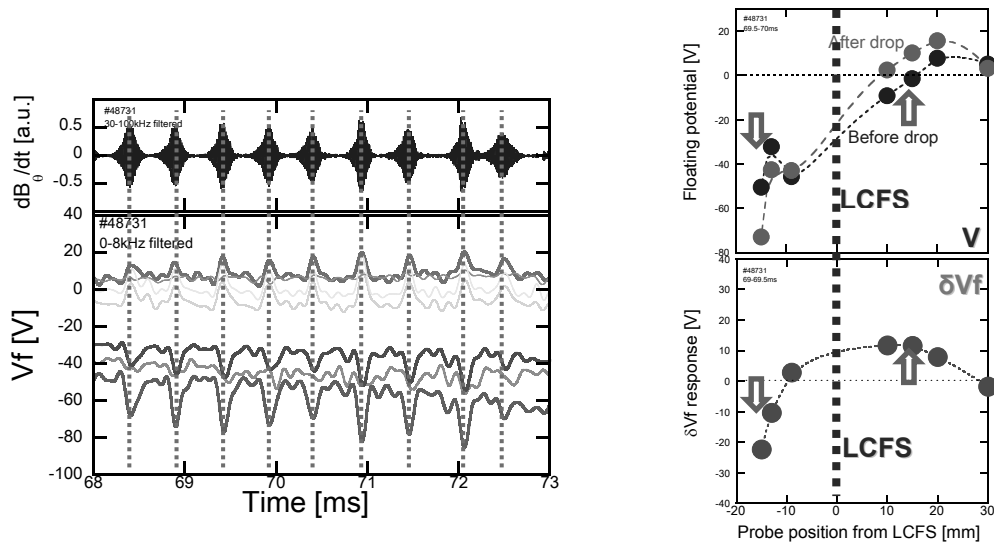


図 2(a)磁気信号で観測されるバースト信号と(b)バーストに同期したポテンシャル応答。(c) 典型的なバースト時の典型的浮遊電位( $V_f$ )分布変化と (d) 電位の変動成分( $\delta V_f$ )分布図

ズマにおいて観測される高周波を伴う高速イオン励起によるアルヴェン固有モードの一種である。

プローブ計測によってこのバースト現象と同期して周辺プラズマの電位構造が変化する現象が見出された。電位変動の大きさは、バーストの磁場揺動強度に明らかに比例し、図1(a)と(c)のプローブを用いた相関計測によってToroidal/Poloidal方向に対称な構造を持っていることがわかっている。径方向アレプローブによって得られた周辺部のポテンシャルのレスポンスを図2に示す。LCFS内側で電位はドロップし、外側で上昇している(図2(a-b))。尚、径方向にレスポンスのディレイは明確には観測されていない。典型的なポテンシャル分布の変化を図2(c-d)に示す。径方向にポテンシャル変動の大きさが違うことから、バースト時に電場構造が変化していることを多チャンネルプローブによって確認ができた。尚、浮遊電位の計測ではあるがトリプルプローブでの電子温度計測から、この変動は空間電位の応答にほぼ相当している。一方、ECE、およびBES信号にはバースト時の大きな応答は見えていないことから、密度/温度分布のレスポンスは小さく電場の変化を説明できない。更には、バースト時にはプローブ計測でのイオン飽和電流のレスポンスにおいて径方向への遅れが確認された。同様のイオン飽和電流の挙動はCHSでも確認できており、これは高速イオンの径方向輸送であると解釈できる。つまり、バースト時においてプラズマ内部の高速イオン分布が変動していることを示唆する。

また、BES計測によってバースト時のプラズマ内部の揺動構造の変化を観測した。揺動の径方向の位相構造を明らかにするため、Hilbert変換を用いた瞬時位相の評価法を考案し、実験結果に適用した。50-100kHzのバーストに相当する周波数領域の揺動をバンドパスフィルタで取り出し、Hilbert変換によって瞬時位相と瞬時強度を評価した。MHD現象のような背景乱流に対して強度が強い揺動の場合には、支配的揺動の強度と位相をこの手法を用いて評価が可能である。さらに何周期かのバースト時の振る舞いについてConditional average法を使うことで平均的な揺動強度と位相の振る舞いを抽出した。その結果バースト一周期の間で揺動の空間構造が変化していることが確認した。この不安定性がバースト的ではなく連続的に発生している場合には空間構造の時間的变化は見られなかった。高速イオン励起不安定性の空間構造が変動していることは、その不安定性を駆動している高速イオンの分布が変化してことを示唆する。

#### 4. まとめと今後の展望

本研究では、ヘリオトロンJ装置において、コンパクト、且つ多チャンネルを有する径方向プローブを開発し、実際の揺動計測に適用した。高速イオン励起不安定性時に起因して周辺ポテンシャルおよび電場構造が変化していること確認した。またイオン飽和電流の応答とBES計測器の結果から、高速イオンの径方向輸送に起因するレスポンスを確認できた。高速イオン励起不安定性が、高速イオン輸送過程を通じて径電場構造に影響を与え得ることを直接実験的に示すことに成功した。

## 磁場閉じ込め高温プラズマ中の電子熱輸送の状態評価のための 確率論的手法の高度化

自然科学研究機構 核融合科学研究所 田村直樹

### 研究の目的

最近になって研究代表者らは、乱流に支配された磁場閉じ込め高温プラズマ中の電子の熱輸送状態に対して確率論的手法を適用し、磁場閉じ込め高温プラズマの閉じ込め状態に関する新しい評価手法を提示した。これにより、例えば、非局所輸送現象と呼ばれるプラズマ周辺部を冷却するとほぼ同時にプラズマ中心部の電子温度が上昇する現象が、従来考えられていたプラズマ中心部において輸送が改善する遷移が発生したためではなく、1) プラズマ周辺部において輸送が改善する遷移が発生し、2) そのプラズマ周辺部が輸送の変化に対して裕度の高い状態になっているプラズマ中心部と相互作用を起こしたためであることを明らかにした。

本研究の目的は、同評価手法で取り扱う測定データに対し雑音成分の低減技術や統計精度向上技術などを適用して、同評価手法の高度化を目指すとともに、異なるデータ解析手法と組み合わせることで自明でない新たな物理情報を抽出することである。

### 研究方法

本年度は、磁場閉じ込め高温プラズマ中の電子熱輸送の状態評価のための確率的手法の高度化を目指して、同手法で取り扱っている実験データに対して雑音成分の低減技術の適用を試みた。具体的には、核融合科学研究所の大型ヘリカル装置 (Large Helical Device: LHD) で測定された電子サイクロトン放射 (Electron Cyclotron Emission: ECE) 信号に対して、適応デジタルフィルタ (Adaptive Digital Filter: ADF) による雑音成分除去を試みた。

### 結果

LHD で測定された ECE 信号の時間発展の一例を図1 (a) に示す。ここで示したのは、サンプリング周波数 10 kHz で測定されたのち、500 Hz のローパスフィルターを通過した後の信号である。その周波数スペクトルを見ると、60 Hz を基本波とし、その3倍、5倍、7倍高調波が信号に重畳されていることが分かる。これは明らかに交流電源由来の誘導雑音である。そこで、雑音の時系列を短時間の逐次学習で推定できる適応デジタルフィルタ (ADF) を用いて除去することを試みた。その結果を図2に示す。図2 (b) より、ADF 適用後の信号にも、60 Hz の基本波とその2倍高調波が依然として強く残っているのが分かる。ADF とは、推定すべき信号を参照信号のフィルタ係数によって重みを付けたフィルタ出力で推定する有限インパルス応答フィルタである。ADF は、本来、時間平均が0の信号に対して効果的に働くように設計されている。つまり、適応操作によりフィルタの残差が0に近づくことでフィルタ係数更新量が0に近づき、フィルタ係数が安定に収束する。しかし、ここで取り扱っている ECE 信号の平均は常に0以上である。このため、ECE 信号に従来の ADF (以下、従来型 ADF と呼ぶ) を適用すると、雑音をフィルタ出力で推定できたとしてもフィルタの残差には一定の値が残ることになる。この時、係数更新量にも同様に一定の値残り、0に収束しない。その結果、図2 (c, d) が示すようにフィルタ係数の更新は周期的となる。これらのことから、ECE 信号に対する従来型 ADF の適応推定能力は低下してしまっていると考えられる。

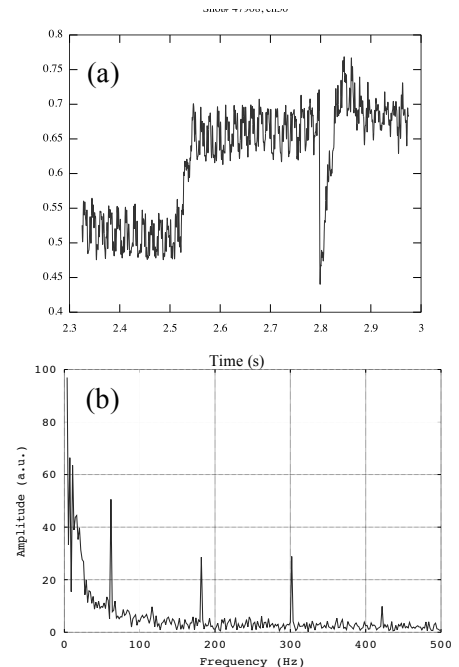


図1. (a) LHD で測定された ECE 信号の時間発展の一例。(b) (a) で示した信号の周波数スペクトル。

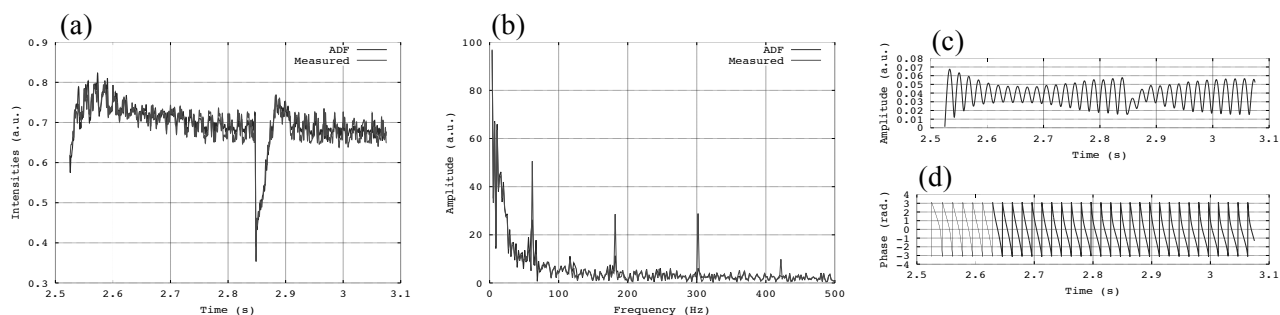


図2. (a)従来型 ADF を適用する前後の時間発展。(b)(a)で示した信号それぞれの周波数スペクトル。(c) 振幅及び(d)位相に対するフィルタ係数の時間発展。

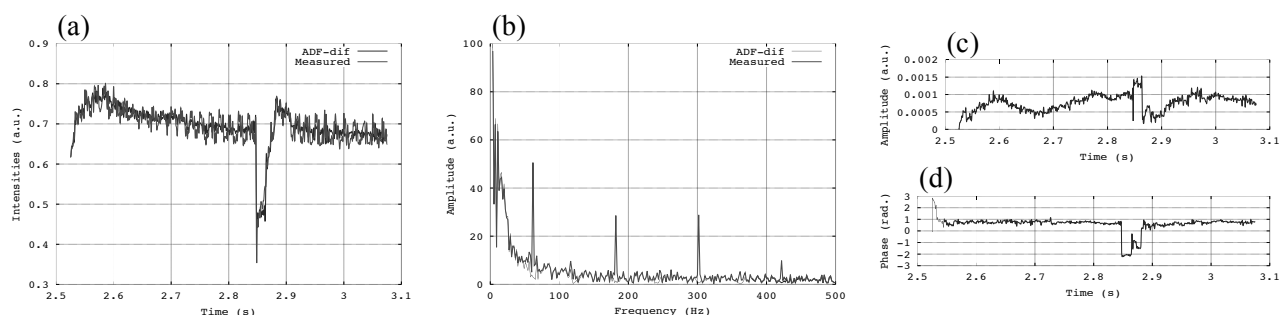


図3. (a)差分型 ADF を適用する前後の時間発展。(b)(a)で示した信号それぞれの周波数スペクトル。(c) 振幅及び(d)位相に対するフィルタ係数の時間発展。

均は元の信号に比べて0に近くなる。そこで次に、この時間差分された信号に対して ADF の適用を試みた(以下、時間差分された信号に対して適用する ADF のことを差分型 ADF と呼ぶ)。その結果を図3に示す。図3(b)より、従来型 ADF では十分に除去することができなかった 60Hz の基本波とその2倍高調波も差分型 ADF では良好に除去できていることが分かる。また、図3(c, d)に示すように、従来型 ADF では周期的に振動していたフィルタ係数も、一部を除いて安定に推移している。このように、差分型 ADF を用いることで、従来型 ADF よりも高い除去性能で ECE 信号に重畳している誘導雑音の除去に成功することができた。ただし、ECE 信号が急激に変化した直後は、図3(c, d)が示すようにフィルタ係数の適応がうまく機能しておらず、図3(a)が示すように ADF 適用後の信号は元信号から大きく逸脱してしまった。

## 今後の予定

ECE 信号の時間変化が急激な場合においても、ADF による誘導雑音除去性能が劣化しないようにさらなる改善を進める予定である。

## 研究成果報告

なし

## 謝辞

適応デジタルフィルタによる雑音成分除去に関して助力頂いた、寺西大准教授(広島工業大学)及び岩間尚文特任教授(自然科学研究機構)に対してここに感謝の意を表します。

## 研究組織(合計10名)

研究代表者: 田村直樹(核融合科学研究所)

研究協力者: 稲垣滋、永島芳彦、藤沢彰英、伊藤早苗(以上、九州大学応用力学研究所)、小林達哉(九州大学総合理工学府)、土屋隼人、徳沢季彦、居田克巳、伊藤公孝(以上、核融合科学研究所)

## 直線磁化プラズマにおけるストリーマー構造の解析

東京大学 大学院新領域創成科学研究科 山田 琢磨

## 目的

低温度で近接性に優れた乱流直線プラズマ実験装置 (LMD-U) において、メソスケール構造の一種であるストリーマーが世界で初めて発見された[1]。この発見は、120 チャンネルに及ぶ静電プローブデータの同時計測に加え、二次元フーリエ解析や、二次元バースペクトル解析という革新的な方法により実現した。しかしストリーマー構造に関しては、マイクロ構造であるドリフト波乱流との詳細な非線形結合関係や、ストリーマーを形成する上で重要な役割を果たす媒介波の空間構造など、未だに解明されていない事象が多い。そこで LMD-U の実験データをより詳細に解析すること、および数値計算シミュレーションコード (NLD) を用いて LMD-U の放電条件に近い状態で直線プラズマの乱流をシミュレートすることで、更なるストリーマー研究の進展を目指す。

## 実験方法

LMD-U を用いてストリーマー実験を行い、ストリーマー (周方向に揺動が局在した構造) や媒介波の空間構造を解析した。LMD-U は軸方向の長さが 3.74 m、内径 0.45 m の筒状の直線装置である。ソース部に付けられた内径 0.095 m のガラス管にアンテナで 3 kW/7 MHz の RF 波を印加し、ヘリコンプラズマを発生させる。軸方向の磁場は 0.01–0.15 T まで変化させることができるが、0.09 T に設定し、内部に封入したアルゴンの圧力を 2–1.5 mTorr まで下げると、ドリフト波乱流がストリーマー構造を形成する。中心部の密度は  $10^{19} \text{ m}^{-3}$  程度、電子温度は平坦で  $3 \pm 0.5 \text{ eV}$  である。軸方向 1.885 m の位置に周方向 64 チャンネル静電プローブ[2]が設置されている。このプローブにより、半径 40 mm の位置での詳細で精度の良い乱流の時空間構造を観測することが出来る。また、軸方向 1.375 m の位置にはプラズマ断面を 2次元スキャンすることのできる静電プローブが設置されているが、周方向プローブと併用することで、径方向スキャンのみでプラズマ断面全ての情報を得ることが出来る。

次に、NLD を用いた抵抗性ドリフト波シミュレーションについて述べる。NLD コードは 3 場の簡約流体コードであり、円筒プラズマのドリフト波を模擬するコードである[3]。使用した主なパラメーターは、プラズマ半径  $a = 70 \text{ mm}$ 、装置長  $\lambda = 4 \text{ m}$ 、密度  $n_0 = 1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 、温度  $T_e = 3 \text{ eV}$  である。中性粒子とイオンとの衝突周波数を  $\nu_{in} = 0.03 \Omega_{ci}$  としている。ここで、中性粒子の衝突周波数は不安定性のコントロールパラメーターとなり、構造分岐をもたらすパラメーターであり、いまストリーマー状態となる値を用いている。粒子ソース分布は  $S_M(r)$  は、 $S_M(r) = S_0/L_N^2 [1 - (r/L_N)^2] \exp[-(r/L_N)^2]$  のように与えられており、それぞれのパラメーターを  $S_0 = 0.2$ 、 $L_N = 67 \text{ mm}$  の様を選んでいく。

## 実験結果

ストリーマーが発生している状態での周方向 64 チャンネルプローブで測定したイオン飽和電流の揺動 (密度揺動) [図 1(a)] を 2次元フーリエ解析すると、図 1(b) に示されるように周方向波数一周波数  $(m, f) = (1, -1.2 \text{ kHz})$  のイオン反磁性ドリフト方向に伝播するモード(1)と、 $(m, f) = (2, 7.8 \text{ kHz}), (3, 6.6 \text{ kHz}), (1, 9.0 \text{ kHz}), (4, 5.4 \text{ kHz})$  の電子反磁性ドリフト方向に伝播するモード(2–5)が観測された。周方向角・周波数は電子反磁性方向を正に選んでいる。つまり図 1(a) の正に向かう細かい揺動成分がモード(2–5)などから成り、それらが周方向に自己収束して局在している。局在構造は  $m = 1$  の構造を持ちながらゆっくりとイオン反磁性方向に伝播し、それはモード(1)の周波数(-1.2 kHz)に一致する。局在構造がスペクトル中のモード(1)として現れるわけではなく、図 1(a) 下に示すように、局在構造とモード(1)が同時に存在する。これはモード(1)が(1, 2, 3), (1, 4, 2), (1, 3, 5)の組み合わせのように非線形結合をしているために局在構造がモード(1)と同じ構造となって現れるためである。次に、これらの組み合わせのバイフェーズを計算し

た。バイフェーズは、モード(1)と局在構造の包絡線の位相差を示す。そこで周方向プローブで測定したモード(1)と、径方向プローブで測定したモード(2-5)を用い、各組み合わせのバイフェーズの径方向分布を計算した(単チャンネル測定なので  $m$  の測定はできないが、図 1(b)より周波数のみの測定で充分モードが分離できているとみなす)。結果、(1, 2, 3), (1, 4, 2), (1, 3, 5)の全ての組み合わせにおいて、径方向に平坦なバイフェーズ分布が観測された。これは、局在構造が径方向にほぼ同位相で連なり、径方向に伸びた構造、つまりストリーマー構造であることを明快に示している。また、図 1(c)はモード(1)の周方向プローブと径方向プローブ間のクロススペクトルの実部を表し、位相構造を示す。径方向に伸びたストリーマー構造と異なり、媒介波は  $r=30$  mm あたりに節を持ち、位相が突然飛ぶことが分かった。

NLD を用いた数値シミュレーションでは、支配的なドリフト波のモード数、周波数は  $(m, n, \Omega_{m,n}) = (2, 1, 0.007 \Omega_{ci})$ ,  $(3, -1, 0.005 \Omega_{ci})$  となり、これらの結合により  $(m, n, \Omega_{m,n}) = (1, -2, -0.002 \Omega_{ci})$  という媒介波を駆動する。図 1 (d)は密度揺動の周方向分布の時間発展( $r/a = 0.8$ )、(e)はその 2 次元スペクトル、(f)は媒介波(1, -2)のポロイダル断面のスナップショットを示す。図 1(d)より揺動は電子反磁性方向へ伝播し、揺動の変調はイオン反磁性方向へゆっくり伝播していることが分かる。図 1(e)の 2 次元スペクトル図も実験と非常に似たものになっている。図 1(f)は媒介波の空間構造であるが、これはイオン反磁性方向へ伝播し、径方向に 1 つ節を持っている。この媒介波の特徴は、前述の実験結果の空間構造と類似している。数値シミュレーションでこのような径方向に節を持つ媒介波構造が観測されたのは初めてである。

## 参考文献

- [1] T. Yamada *et al.*, Nature Phys. **4**, 721 (2008).
- [2] T. Yamada *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **78**, 123501 (2007).
- [3] N. Kasuya *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **76**, 044501 (2007).

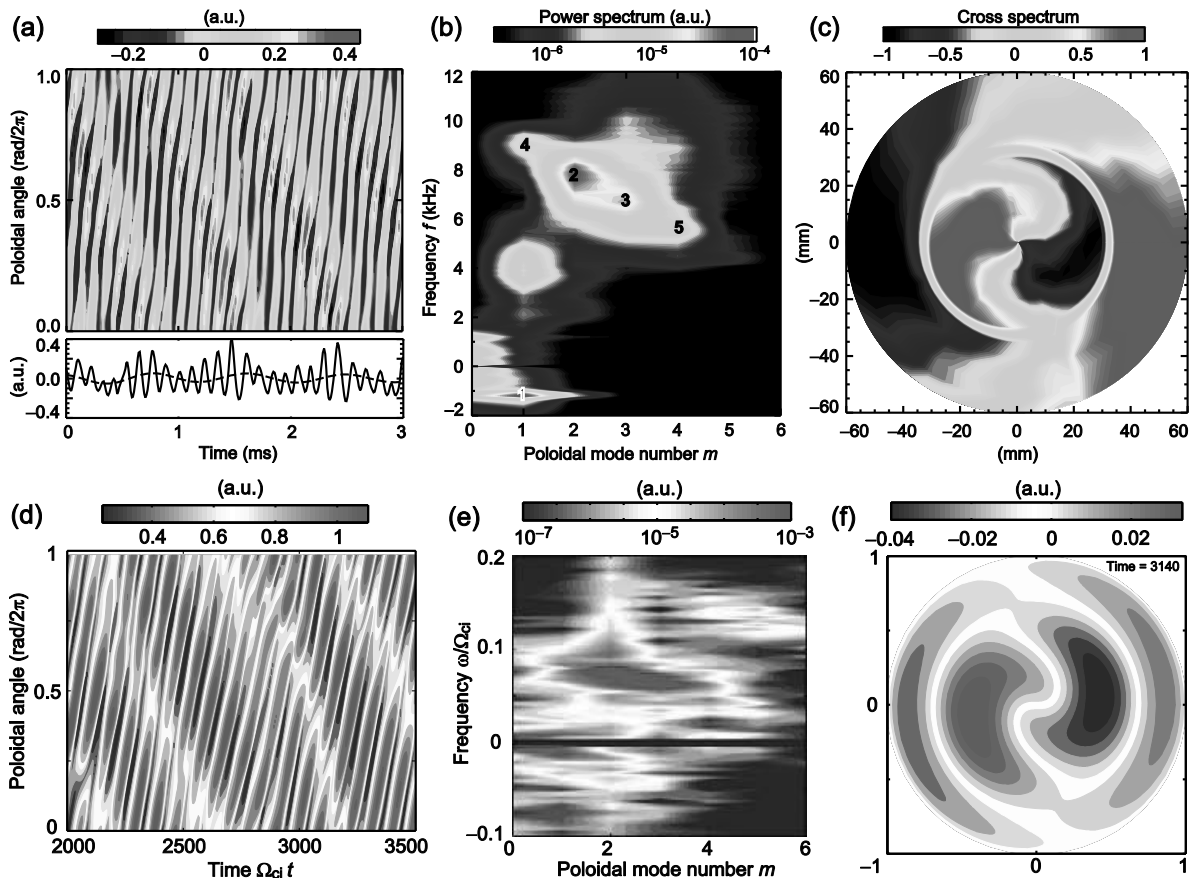


図 1 : LMD-U および NLD で観測された(a,d)揺動の時空間構造、(b,e)その 2 次元スペクトル、(c,f)ストリーマー構造の媒介波の位相構造。

## バイスペクトル解析による電子温度勾配モードと低周波揺動 の非線形結合機構解明

東北大学 大学院工学研究科 金子 俊郎

### 1. 目的

電子温度空間勾配を自在に制御できる新たな装置を開発し、核融合プラズマ閉じ込め装置での異常輸送の新たな要因として注目を集めている「電子温度勾配不安定性 (ETG モード) 駆動乱流」の発生メカニズムとそれに伴う輸送現象を解明することを目的とする。特に、電子密度勾配、空間電位勾配等を重畳することによって励起される低周波揺動との非線形相互作用によって、ETG モードが助長されるメカニズムを明らかにすることを旨とする。本研究では、MHz 領域の高周波揺動と kHz 領域の低周波揺動との非線形相互作用を調べるために、大容量のデータを取得する必要があるとともに、その解析手法もバイスペクトル解析をはじめとして多岐にわたるため、応用力学研究所との共同研究として遂行する。

### 2. 実験方法

本実験は図 1 に示す東北大学 Q<sub>T</sub>-Upgrade 装置を用いて行う。アルゴン (Ar) を作動ガスとした電子サイクロトロン共鳴 (ECR) 放電によって磁気ミラー領域 (共鳴磁場強度 2.14 kG) で高電子温度 (3-4eV) のプラズマを生成し、グリッドを通して実験領域に流入させる。一方、装置右端に配置したタングステン電極を 2000°C 以上に加熱することによって低温の熱電子 (約 0.2 eV) を生成し、半径方向位置に対応してこれらの重畳割合を制御することによって、径方向の電子温度勾配を形成する。すなわち、電子密度、空間電位の空間勾配が一定の下で、電子温度のみの空間勾配を制御し、その時のプラズマ中の不安定揺動 (ETG モード) に対する影響を調べる。具体的には、周波数が数 kHz から数 MHz の範囲で、電子温度勾配が存在する領域と存在しない領域で、発生する不安定揺動の違いがあるかどうか注目する。また、電子密度勾配および空間電位勾配を変化することでドリフト波 (DW) モードが励起されることを観測し、それらの ETG モードとの非線形相互作用を調べる。このとき、取得した大容量のデータを応用力学研究所に持ち込み、バイスペクトル解析を行う。

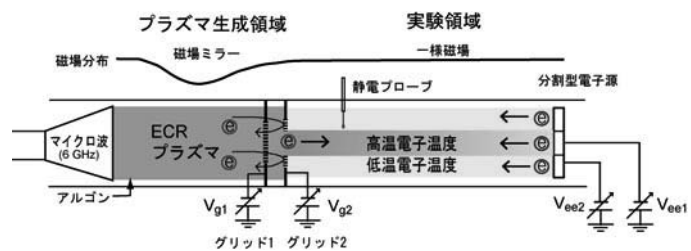


図 1: 電子温度勾配形成実験装置。

### 3. 実験結果及び考察

上記の装置を用いて ETG を形成したところ、ETG 強度の増大に伴い、周波数が約 0.4 MHz の高周波揺動 (ETG モード) と約 7 kHz の低周波揺動 (DW モード) の二つの揺動が励起されることが観測された。図 2 に ETG によって励起された ETG モードおよび DW モードの (a) 規格化振幅強度 ( $\tilde{I}_{es}/\bar{I}_{es}$ ) と (b) バイコヒーレンスの電子温度勾配 ( $\nabla T_e$ ) 依存性を示す。 $\nabla T_e$  が増加することで ETG モードの強度が大きくなるが、 $\nabla T_e$  が 0.7 eV/cm を超えると次第に飽和していくことが分か

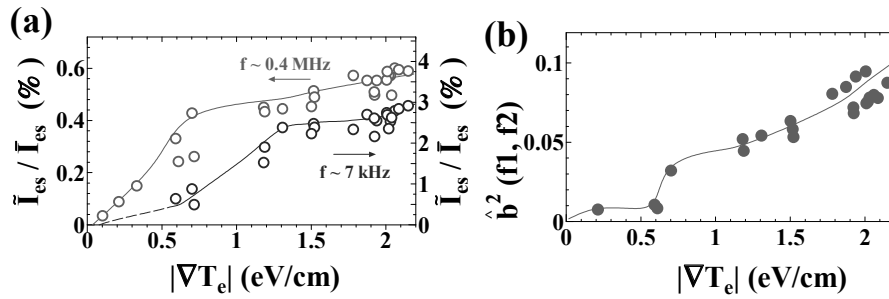


図2: 高・低周波密度揺動における(a)規格化振幅強度と (b)バイコヒーレンスの電子温度勾配( $\nabla T_e$ )依存性.

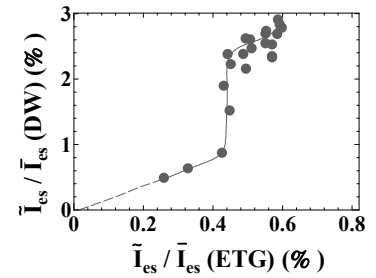


図3: ETGモードとDWモードとの揺動強度の相関性.

った. 一方, DWモードの場合には,  $\nabla T_e > 0.7$  eV/cm において揺動強度が増大する傾向を示した. さらに, 図 2(b)より,  $\nabla T_e \sim 0.7$  eV/cm 以上で ETGモードとDWモードのバイコヒーレンスが急激に大きくなることが明らかになった. これらの結果から, DWモードはETGモードとの非線形結合によって増幅されたと考えられる.

図3にETGモードの揺動強度に対するDWモードの揺動強度の依存性を示す. ETGモード強度が0.4% ( $\nabla T_e \sim 0.7$  eV/cm)を超えたとき, DWモード強度の急激な増大が観測された. この結果より, ETGモードの揺動強度が閾値を超えることでDWモードとの非線形結合が助長され, エネルギーが移送されることでDWモードが増幅されたと考えられる.

図4に, 急峻なETGが形成されている $\nabla T_e \sim 2$  eV/cmの場合における高・低周波密度揺動間のバイコヒーレンスの(a)  $f_3 = \sim 0.4$  MHz 及び (b)  $f_3 = \sim 7$  kHz に沿ったスライスを示す. 0.4 MHz (ETGモード) と 7 kHz (DWモード) の揺動間で特異的にバイコヒーレンスが大きくなっていることが観測され, ETGモードがDWモードと選択的に非線形結合していることが明らかになった.

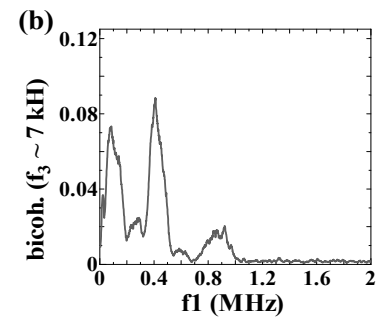
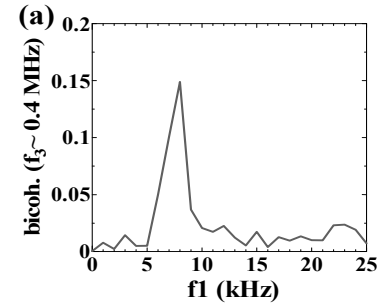


図4: 高・低周波密度揺動におけるバイコヒーレンスの (a)  $f_3 = \sim 0.4$  MHz 及び (b)  $f_3 = \sim 7$  kHz に沿ったスライス.

#### 4. 研究組織

金子 俊郎, 畠山 力三, 文 贊鎬 (東北大学), 伊藤 早苗, 稲垣 滋, 小林 達哉 (九州大学)

#### 5. 研究成果報告

- 1) [招待講演] 金子 俊郎, プラズマ・核融合学会 九州・沖縄・山口支部第 16 回支部大会論文集, (2012. 12. 23), pp. 51-52.
- 2) C. Moon, R. Hatakeyama, and T. Kaneko, Abstracts of 11th Asia-Pacific Conference on Plasma Science and Technology and 25th Symposium on Plasma Science for Materials, (2012. 10. 3), p. 374.
- 3) 文 贊鎬, 畠山 力三, 金子 俊郎, 第 29 回 プラズマ・核融合学会年会予稿集, (2012. 11. 28), p. 28aC03.

## 24 特 2-11

「磁場閉じ込めプラズマにおける乱流及び帯状流の検出方法の開発」

核融合科学研究所 ヘリカル研究部

井戸 毅

### ・ 目的

磁場閉じ込めプラズマの物性を理解する上で、プラズマの輸送特性を決定づけていると考えられる乱流の振舞いを理解することが重要である。近年では局所的な微視的乱流だけでなく、それらの非線形相互作用により形成される大きな空間構造を持つ揺らぎがプラズマの輸送に大きな影響を及ぼすことが明らかになりつつある。したがって、局所的な微視的乱流と同時に大規模構造を持つ揺らぎを同時に測定・解析することが、プラズマ物性を実験的に解明する上で不可欠である。しかしながら、核融合炉を見据えた磁場閉じ込め装置では乱流に関するデータは計測可能な物理量の種類、計測できる空間点ともに限られている。そこで、本共同研究を通じ、応用力学研究所の直線装置 PANTA を用いた実験研究を通じて開発された揺動解析手法の応用や、理論解析及びシミュレーション結果に基づく効率的な実験手法と解析手法の開発を進め、限られた乱流計測データからより多くの物理情報を抽出することを目的として本研究を行う。

### ・ 実験方法

核融合科学研究所の大型ヘリカル装置 (LHD) において高速イオン励起 GAM の計測が行われており、今年度はこの空間構造及び GAM とイオンとの相互作用を定量的に調べるための実験及びその解析を行うこととした。

これまでの実験で GAM 励起時に高速イオン (~170keV) と GAM の相互作用を示すエネルギースペクトルの変化を観測し、同時に数 keV のバルクプラズマのエネルギー領域におけるエネルギースペクトルの変化も測定されている。これらの現象を M. Sasaki et al. *Plasma Phys. Control. Fusion* **53**, 085017 (2011) で提案された理論に基づいて定量的に議論するために、重イオンビームプローブ (HIBP) を用いて GAM に伴う電位揺動を計測した。

また、GAM の空間構造に関しては M.Sasaki, et al., *Plasma Fusion Res.* **3**, 009 (2008) に見られるような非対称性の検証も試みる実験を行った。

### ・ 実験結果

GAM の発生を再現することができ、HIBP による電位揺動データの取得が行えた。その結果、これまで時間分解能の不足で測定できていなかった GAM の高次高調波に伴う電位揺動を検出することができた。この高次高調波の発生は電位揺動波形が正弦波から鋸歯状波

形になることに対応していることが明らかとなった。

通常の GAM のように単一周波数モードであれば、その位相速度は単一であるため、エネルギーの大きく異なる高エネルギー粒子とバルクプラズマとに同時に相互作用することは考えにくい。これまでに観測されているイオンのエネルギースペクトルの変化を理解するには、上述の M. Sasaki (2011) の理論に加え、波動一粒子の共鳴条件を説明する物理機構の検討が必要である。今回観測された高次高調波が発生する物理機構は、波動一粒子共鳴が発生する物理機構解明の手掛かりとなる可能性がある。

しかしながら、LHD 本体のトラブルのため、十分な数のデータを取得することができず、当初本共同研究で行う予定であった空間構造の同定と理論モデルとの比較や、実験の目的であった GAM が持つパワーの定量的な評価は行えなかった。結論を得るには至らなかったが、実験条件の絞り込みが進み、また物理機構解明の手掛かりの可能性の一つが得られたことは、次年度以降の実験立案、共同研究でのデータ解析・議論の進め方の指針になる成果である。

- ・ 研究成果報告

無し

- ・ 研究組織

井戸 毅 (研究代表者)	核融合科学研究所	准教授
清水昭博	核融合科学研究所	助教
稲垣 滋 (所内世話人)	九州大学応用力学研究所	准教授
佐々木 真	九州大学応用力学研究所	助教

## 高次相関解析の並列処理による高性能化に関する研究

京都大学大学院工学研究科 福山 淳

**研究目的：**プラズマ・核融合分野では、測定技術の向上に伴い、時間および空間解像度が大幅に増加し、短時間の間に大量の実験データを取得することが可能になってきている。また、実験の長時間化に伴う蓄積データの増大も著しい。応用力学研究所の PANTA 実験装置においても、多チャンネル測定装置を用いて得られる実験データが一放電あたり数 10GB 以上に達し、その高次相関解析のデータ処理時間が 1 日を超える場合も少なくない。本研究においては、高次相関解析等の実験データ処理を高性能に行うため、複数コアの計算機による並列処理を導入し、アルゴリズムの検討ならびにコードの実装を行い、高速な実験データ処理を実現することを目的としている。

**研究方法：**実験データの高次相関解析においては、時間的あるいは空間的に離れた位置での測定値の相関を計算する必要があり、データ処理の局在性が低くなるため、並列処理にはなじまない面がある。本研究では相関解析と同様な構造をもつ高速フーリエ変換処理 (FFT) の並列化を参考にして、相関解析の並列化アルゴリズムを検討する。次に、最終的に導かれた並列化アルゴリズムに基づいて計算コードを実装し、解析解との比較による検証を行う。最後に、PANTA 実験装置において測定された乱流データを利用して相関解析を行い、並列処理による高性能化の評価を行う。

**研究成果：**

1. 代表的な相関解析である Bispectral analysis の高速化については、FFT の高速化が本質的であるため、まずその定量化を行った。並列化 FFT ライブラリである FFTW をインストールし、通常版、OpenMP による共有メモリ型並列処理版、MPI による分散メモリ型並列処理版のそれぞれについて、FFT 処理性能を処理データ量の関数として求めるとともに、コンパイラ (Intel Fortran, PGI Fortran, GNU Fortran) の比較およびコンパイラオプションの比較も行った。
2. さらに Wavelet bicoherence analysis についても、FFT による処理の検討を行い、並列処理の評価を行った。

**今後の予定：**大規模データ処理に向けて、メモリ割付やファイル入出力の並列化を含めて高速化の検討を行い、その最適化をはかる。そして具体的にデータ処理コードを作成し、PANTA 実験装置の測定データを例として処理性能の比較を行う。

**研究組織：**

氏名	所属	職名等	役割・担当分野
福山 淳	京都大学	教授	代表者
稲垣 滋	九大応力研	准教授	実験データ解析
佐々木 真	九大応力研	助教	実験データ解析



光・ミリ波・マイクロ波を用いた計測技術・解析モデルの開発と  
その応用に関する研究

九州大学 応用力学研究所 出射浩

研究目的：

光・電磁波を用いた計測は、測定対象に擾乱を与えずに波動・揺動といった局所的な物理量を対象とでき、測定される局所情報を用いて大域のダイナミクスを理解する重要な計測手法となっている。雲レーダやライダーによる雲やエアロゾルの計測、波浪に伴う海表面散乱による海上風計測、地表面計測、プラズマでの散乱計測など応用分野は多岐に及ぶ。計測技術として、反射の不連続面の利用、位相測定による高空間分解能化など、新たな試みが進められている。また、観測される局所的な反射・散乱射情報をどのように理解するか等の解析モデリングも広く議論されている。本課題では、多岐に渡る応用分野での計測技術・解析モデルの課題を、分野を横断して議論し、新たな方法論の模索を目指す。先進的な光・ミリ波・マイクロ波計測の観測的研究、解析理論・モデリング研究に関する研究集会を持ち、応用力学研究所共同研究の特定研究テーマとして個別に提案されている課題を総括的に議論することを目的とする。

研究進捗：

応用力学研究所共同研究の特定研究としては、他分野を横断する広範なテーマを立ち上げる新たな試みである。キーワードとなる現象の一つは「散乱」である。プラズマでの散乱では、非協同、協同散乱現象があり、本特定研究では主に協同散乱現象が取り上げられ、散乱断面積の理論的評価と実験結果の比較検討が進められている。本研究課題では、散乱現象としては、海表面散乱、ライダー計測など対象となっている。別途、個別に採択されている「光・ミリ波・マイクロ波を用いた計測技術・解析モデルの開発とその応用に関する研究（研究集会）」では、その観測、解析理論・モデリングに関し、各課題で問題となっている点を紹介いただき、可能な「他分野を横断する共同研究テーマ」を模索した。特に観測領域での計測技術では、共通化される問題が多く、各々で行われている計測手法・技術を、分野を横断して議論した。散乱計測が中心課題である。解析理論・モデリングでも、同じく問題となっている点に関し、多岐に渡る分野からの視点から、議論された。プラズマで励起された波動の直接検出や非コヒーレント波の検出にも触れ、これらの計測技術の新たな適用を模索した。次年度は、個別に採択されている研究課題の進捗に応じて、共通となる課題を取り上げ、各分野、異なる視野からのアプローチで問題解決を図る予定である。



## ウィンドプロファイラの鉛直流測定を活用した雲・降水の定量的測定

京大生存圏研究所 山本真之

### 1. 研究目的

2015 年の打上げが予定されている EarthCARE (EC) 衛星は、ミリ波雲レーダ (Cloud Profiling Radar; CPR)・ライダー等を用いた雲・エアロゾルの全地球的な衛星観測から気候変動予測の精度向上に向上することを目的としている。EC 衛星に搭載された CPR・ライダー等の複合測定データを用いた雲微物理量リトリーバルアルゴリズムの開発は、九大応力研の主導で開発が進められている。しかし、雲微物理量リトリーバルアルゴリズムの開発に不可欠である、高精度の鉛直流・雲物理量測定データが不足している。特に、EC 衛星用 CPR で計測するドップラ速度を用いた雲微物理量リトリーバルにおいて、鉛直流は最もリトリーバルされた物理量の不確定性を生む要因である。そのため、鉛直流の高精度測定データを用いた雲微物理量リトリーバルアルゴリズムの開発が必要とされている。

ウィンドプロファイラ (Wind Profiler Radar; WPR) は、鉛直流を数分以下・数 100m 以下の時間・鉛直分解能で測定できる特長を備える。特に 50MHz 帯 WPR は、降水・雲の領域においても精度よく鉛直流を測定できる、他の観測機器にはない特長を持つ。本研究では、地上設置の WPR と降水粒子を観測する気象レーダ・CPR 等の観測データを活用することで、EC プロジェクトにおける雲微物理量リトリーバルアルゴリズムの開発に寄与できる雲・降水の定量的測定手法を開発する。さらに開発した測定手法を活用することで、鉛直流・雲物理量・降水物理量の測定データを作成することを目的としている。

### 2. 鉛直流のデータ処理手法開発

#### 2.1 降水領域における 50MHz 帯 WPR の鉛直流推定手法の開発

50MHz 帯 WPR は、屈折率擾乱に起因する晴天乱流エコーと降水粒子からの散乱エコー (降水粒子エコー) に対する感度が同程度であり、かつ降水粒子落下速度が鉛直流と比較して十分大きいこと、晴天乱流エコーと降水粒子エコーを分離可能である。しかし、晴天乱流エコーと降水粒子エコーを分離し、さらに晴天乱流エコーのドップラースペクトルから鉛直流計測データを得る上で必要なデータ処理は人手に頼る部分が多いため、鉛直流のデータセット作成に膨大なデータ処理時間 (1 日間のデータ処理に数日) を要していた。そのため、少なくとも半自動で晴天乱流エコーの存在範囲を決定することで、鉛直流計測データを効率的に得るための手法の開発に取り組んだ。開発した手法の概要は以下の通りである。

- ・ 晴天大気エコーと降水粒子エコーの分離が特に困難であるのは落下速度が  $1.5 \text{ m s}^{-1}$  程度と小さい固体相の降水粒子エコー (氷晶・雪片) である。そのため、固体相の降水粒子エコーを想定した検討を実施した。
- ・ 50MHz 帯 WPR の観測結果をもとに、鉛直流を  $0.1 \text{ m s}^{-1}$  の上昇 (スペクトル幅  $0.2 \text{ m s}^{-1}$ )、降水粒子落下速度を  $1.3 \text{ m s}^{-1}$  (スペクトル幅  $0.2 \text{ m s}^{-1}$ ) とした。時系列データにカイ2乗分布を持たせることで、鉛直流及び降水粒子落下速度の統計的揺らぎを表現した。信号対雑音比 (SNR) を変化させることで、鉛直流の計算精度を評価した。
- ・ 晴天エコーの存在範囲を決定するため、以下の工夫を行った。
  - 晴天乱流エコーのピーク位置検出時に、高度方向における鉛直流の計算結果の連続性を考慮することで、降水粒子エコーの誤検出を防いだ。
  - 晴天乱流エコーのピークから下降方向に  $1.0 \text{ m s}^{-1}$  の範囲で受信エコーの極小を検出し、エコーの極小位置より上昇方向のみを晴天乱流エコーの領域とみなすことで、降水粒子エコーの混入による鉛直流の計測誤差を減少させた。

図に、計算機シミュレーションによる鉛直流の測定精度の検討結果を示す。鉛直流のピーク存在範囲などの最低限の初期パラメータを与えるだけで、鉛直流を精度よく得ることに成功している。開発した手法が実測定データに適用可能であることを、50MHz 帯大気レーダである MUレーダの測定データを用いて確

認済みである。

## 2.2 鉛直流の高鉛直分解能観測手法の開発

多周波切替え送信と適応信号処理を組み合わせることで WPR の高レンジ分解能 (30-50 m) の高分解能鉛直流計測を達成するレンジイメージングは、雲頂・雲底・融解層付近などの小鉛直スケールの鉛直流擾乱を解像する有用な測定手法である。研究代表者が開発したソフトウェア受信機を 1.3GHz 帯 WPR に用いることで、1.3GHz 帯 WPR によるレンジイメージング測定を実現した。

1.3GHz 帯 WPR によるレンジイメージング測定の実現により、50MHz 帯 WPR では測定できない大気下層 (高度 2km) 以下における鉛直流の高精度計測が可能となった。

## 3. 今後の展開

今年度に得られた成果 (鉛直流計測データを効率的に得る手法の開発) を活用した、50MHz 帯 WPR・気象レーダ・CPR 等の観測データセット作成を実施する。引き続き、観測データを用いた雲・降水物理量の高精度測定手法の開発を行う。観測データセットの作成と雲・降水物理量の測定手法の開発を通じ、EC プロジェクトにおける雲微物理量リトリバルアルゴリズムの開発に貢献する。加えて、1.3GHz 帯 WPR のレンジイメージング観測を活用することではじめて可能となる、大気下層 (高度 2 km 以下) における鉛直流及び雲の同時計測を実現するための活動に取り組みたい。

## 4. 研究成果

### 査読なし論文

山本真之・妻鹿友昭・柴田泰邦・阿保真・橋口浩之・山本衛・山中大学・岡本創, 50MHz 帯大気レーダーと偏光ライダーによる層状性降水内の鉛直流・降水粒子落下速度・偏光解消度の同時観測, 信学技報, 査読なし, SANE2012-111, 7-10, 2012.

### 学会発表

・ Yamamoto, M. K., M. Abo, Y. Shibata, T. Mega, H. Hashiguchi, N. Nishi, H. Okamoto, K. Sato, T. Shimomai, M. D. Yamanaka M. Yamamoto, and Timbul Manik, Syafrijon, Measurement of vertical air velocity and hydrometeors in stratiform precipitation by the 47-MHz wind profiler radar and 532-nm polarization lidar, SPIE Asia-Pacific Remote Sensing 2012, 29 October-1 November 2012, Kyoto, Japan.

・ 山本真之・妻鹿友昭・柴田泰邦・阿保真・橋口浩之・山本衛・山中大学・岡本創, 50MHz 帯大気レーダーと偏光ライダーによる層状性降水内の鉛直流・降水粒子落下速度・偏光解消度の同時観測, 電子情報通信学会宇宙・航行エレクトロニクス研究会 (SANE), 2012 年 11 月 30 日, 千葉大学.

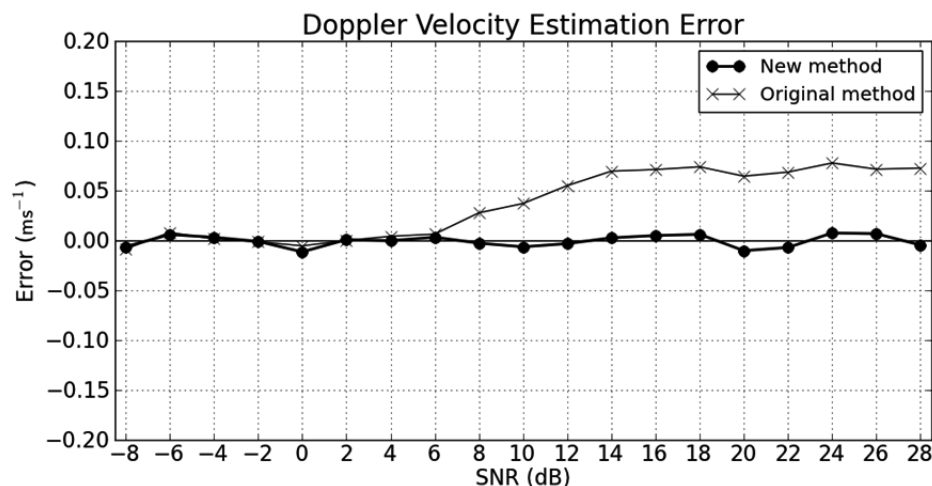


図: 計算機シミュレーションによる鉛直流計測精度の評価結果。太実線は新たに開発した手法における鉛直流の計測誤差を、細実線は晴天乱流エコーと降水粒子エコーを分離しない場合の鉛直流の計測誤差をそれぞれ示す。

## 1. はじめに

マイクロ波イメージングは、磁場閉じ込めプラズマ中の揺動現象の解明に有力な手段として注目されているが、誘電体媒質中の透過特性を利用した物体内部の可視化、全天候型の車載レーダ、航空機搭載レーダなど、リモートセンシングの分野でも有用である。

レーザ計測等と比較したマイクロ波計測の問題点に空間分解の悪さがあり、その改善のため種々の工夫がなされてきた。レンジ方向の空間分解向上に適用されているのが周波数の広帯域化で、FM-CWレーダの変調周波数拡大、パルスレーダの短パルス化が主な手法である。一方、アジマス方向に適用されているのが、アンテナ開口を実効的に大きくとる合成開口処理である。本研究はこれら手法を生体イメージング、航空機搭載レーダの分野に適用し、リアルタイム画像生成の実現を図ることを目的とした。

## 2. マイクロ波生体イメージングの研究

## 2. 1 目的および方法

マイクロ波生体イメージングは、マイクロ波の減衰が比較的小さい胸部の測定（乳がん検出）が中心となっている。現在、乳がん治療に重要となる腫瘍の早期発見を目的として、X線マンモグラフィを用いた検診が行われているが、正常な胸部組織と腫瘍とのコントラストが小さいことに起因する偽陰性、偽陽性の問題が報告されている。本グループでは、マイクロ波領域では胸部組織と腫瘍との誘電率の差が比較的大きいことを利用し、マイクロ波帯の超短パルスレーダ (USPR) を使用した乳がん検知のモデル実験を実施している。

測定システムの概略を図1に示す。パルス幅 65 ps、振幅 8 V をもつインパルス発生器 (PPL 社 3500D) を使用し、その信号をアンテナに給電する。USPR に適用するアンテナは、特に広帯域特性が要求され、本実験では周波数 2-10 GHz の Vivaldi アンテナを使用した。照射されたマイクロ波は誘電体内部を伝搬し、誘電率の不連続面において散乱・反射される。受信アンテナで検出された反射信号はサンプリングスコープ (Agilent 86100A/B) で収集される。胸部ファントムには、実際の乳房を模擬して作成された CRIS 社製バイオプシー・ファントムを用いた。送受信アンテナは、ステップモータ使用の回転ステージに設置されており、胸部ファントムの周囲を  $0^{\circ}$  から  $180^{\circ}$  まで  $5^{\circ}$  ずつ回転する。反射信号は計 37 点の各アンテナ位置で受信、記録され、得られたデータからファントム内部の探査画像を再構成する。

## 2. 2 ファントムを用いた実験結果

マイクロ波生体イメージングの測定で最も大きな課題として、表面反射波成分による SN 比の劣化がある。本実験では、ファントムを押さえるテンプレート (型枠) を使用することにより、反射波成分の再現性を維持し、実際の測定から差し引くことを行った。これにより表面反射波成分を約 1 桁減少させることができた。画像再構成には、合成開口イメージング (Confocal Microwave Imaging) を用いた。これは、胸部ファントムが微小ピクセルに分割された状態を想定し、測定データからそれぞれのピクセルごとに強度を決定することで実現する。各アンテナ位置から注目するピクセルまでのパルスの飛行時間を計算し、各位置での受信信号の飛行時間に対応したデータを重畳する。図2にこのようにして得られた再構成画像を示した。ファントム表面から 20 mm の深さにある 6 mm の異物検出を行うことができた。

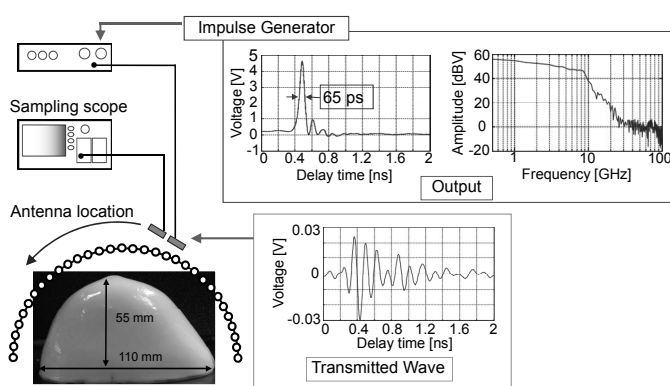


図1. 超短パルスレーダシステムの概略.

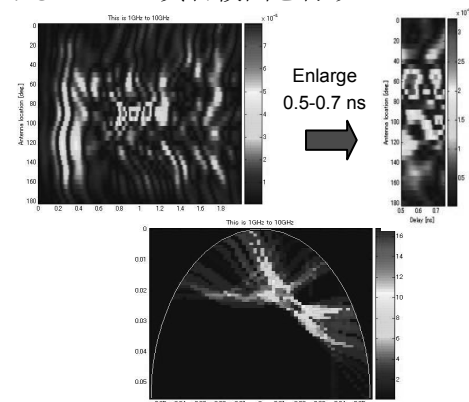


図2. ファントムを用いた画像再構成例.

### 3. スポットライト方式合成開口レーダの研究

#### 3. 1 目的および方法

現在日本で稼働中の航空機等搭載合成開口レーダ (SAR) は L バンド (周波数 1.1-1.7 GHz) および X バンド (8.2-12.4 GHz) を使用し、空間分解はそれぞれ 300 cm、150 cm である。最近、X バンドで分解能 50 cm、Ku バンド (12.4-18.0 GHz) で 10 cm が達成された。しかし、両者とも航空機内におけるリアルタイム画像処理はできず、地上に帰りデータ処理して初めて画像が見られる。また、航空機の進行方向に対しほぼ垂直方向の画像しか撮れないストリップマップ SAR で、災害時の初動対応や、災害地点の詳細調査には不向きである。本グループは、任意の方角の SAR 画像を機上でリアルタイムに処理することが可能な「スポットライト SAR」(“Live SAR”と呼称)の開発製作を平成 21 年度より進めている。

図 3 にマイクロ波システム、図 4 に外観図を示す。波形シンセサイザで生成されたチャープ信号は、Ku バンドに変換され増幅された後、アンテナから地上の設定点 (MCP) に照射される。反射波は参照波信号と混合されデチャープ信号となったのちデジタル回路でサンプリングされ、I/Q データとして取り込まれ画像化される。スポットライト SAR では、マイクロ波を任意の領域に照射できるようにアンテナをジンバルに搭載、慣性センサと GPS も搭載され、飛行に伴う MCP と SAR 本体の相対位置の変化に対応し常に MCP に照射できるようになっている。また、慣性センサの位置情報を用いて参照波信号の発生時間が制御され、画像処理に適した信号の生成が可能となるためリアルタイム性が出てくる。

#### 3. 2 地上試験

“Live SAR” 本体及びソフトウェアはほぼ完成しており、今年度、屋上での試験、車輛を利用した地上試験を実施している。この試験で得られた結果は、レンジ方向およびクロスレンジ (アジマス) 方向の解像度が、それぞれ 10 cm、25 cm であった。プラットフォームの移動距離を増すことができればクロスレンジ方向の分解を向上させることができると考えている。

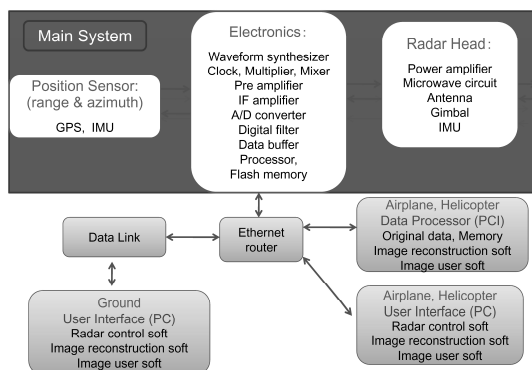
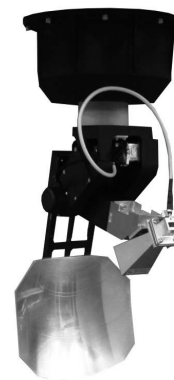


図 3. SAR マイクロ波システム.



(b) アンテナ・ジンバル系

図 4. “Live SAR” 本体の外観写真.

### 4. まとめ

マイクロ波計測の欠点である空間分解の悪さを改善するべく合成開口処理あるいは広帯域の適用を行い、得られた結果について報告した。次年度はリアルタイム性をさらに追究していく。

### 5. 研究成果報告

- [1] S. K. Padhi, A. Mase *et al.*, Proc. Int. Conf. on Electromagnetics in Advanced Appl., Cape Town (2012) 33-1.
- [2] 犬竹、山鹿 他：JA2012 国際航空宇宙展出展、ポートメッセなごや／中部国際空港 (2012 年 10 月).
- [3] D. Zhang and A. Mase, Proc. Asia-Pacific Microwave Conf. 2012, Kaohsiung (Dec. 2012) pp.271-273.
- [4] A. Mase *et al.*, Proc. Asia-Pacific Microwave Conf. 2012, Kaohsiung (Dec. 2012) pp.625-627.
- [5] 犬竹、池地、間瀬、近木 他：平成 24 年度通研共同プロジェクト研究発表会 (2013 年 2 月 28 日).
- [6] 近木、池地、間瀬、犬竹 他：2013 電子情報通信学会総合大会、岐阜大学 (2013 年 3 月 19-22 日).
- [7] D. Zhang and A. Mase, Biomedical Engineering (in press).
- [8] A. Mase, N. Ito, Y. Kogi, H. Ikezi, M. Inutake *et al.*, URSI-EMTS (May 20-24, 2013) 招待講演・発表予定.

### 6. 研究組織

間瀬 淳	九州大学産学連携センター	伊藤 直樹	九州大学産学連携センター
近末祐一郎	福岡工業大学工学部	森山 敏文	長崎大学工学部
犬竹 正明	東北大学電気通信研究所	小田 誠	宮崎県工業技術センター
池地 弘行	九州大学産学連携センター	徳沢 李彦	核融合科学研究所
主 小龍	九州大学産学連携センター	出射 浩	九州大学応用力学研究所

本研究は、一般的なプラズマ波動の励起・減衰過程をそれに伴うプラズマの電子揺動を詳細に計測することにより、明らかにすることにある。その計測手段として、電磁波の散乱法を取り上げ、手法を開発するのが最終的な目的である。電子バーンシュタイン波(EBW)により、定常プラズマの維持を目指している九州大学応用力学研究所の QUEST 装置を例として取り上げ、散乱計測によって、いかに EBW 波動の直接検出を行い、波動構造を決定し、加熱波動の励起、構造、熱化過程を明らかにする手法を開発するのが本研究の当面の目標であり、大電力、定常での EBW を計画し、その直接検出を必要としている装置は、QUEST 以外にはなく、応用力学研究所の共同研究として実施する意義が大きい。また、本研究は、広い意味での散乱計測を手段として用いた被散乱媒質の物性解析手法の開発であり、特定研究としての目的に適ったものである。

電磁波の散乱、特に協同散乱は、プラズマ中の波動の周波数、波数および振幅を、測定対象に擾乱を与えず、空間的、時間的に高分解能で計測する強力な手段として認識されてきた[1]。一方、波動加熱、とりわけ、電子サイクロトロン共鳴を用いた波動加熱は核融合プラズマの生成、加熱、制御において有力な手段であり、近年の大電力ミリ波源の進展や伝送、入射手法の高性能、高精度化も相まって、益々その重要性、有効性が認識されて来ている。しかし、今後必要になると予想される核融合プラズマの高ヘータ化に際して、電磁波モードとしての電子サイクロトロン波加熱はその伝搬において遮断密度が存在することから、電磁波のままでは、プラズマ中心部の加熱ができなくなってしまう。そこで、入射した電磁波をプラズマ中の静電波である電子バーンシュタイン波(EBW)に変換し、遮断密度を越えた加熱を実現する手法が提案され、実機においても EBW によると考えられる明確なプラズマ加熱の効果が確認された[2]。EBW を用いた加熱手法の開発においては、電磁波から EBW への変換過程、EBW の伝搬特性、減衰加熱過程を調べ、最適化を行う必要がある。そのためには、実際の EBW の振る舞いを実験的に計測することが重要である。しかし、これまで、理論的、数値的な解析は多くなされているものの、EBW を波動として直接計測しているのは小型低温プラズマにおいてプローブによって計測された例が報告されているのみである。これまで、プラズマの加熱波動の直接検出と言う意味でも、イオンサイクロトロン周波数帯でのイオンバーンシュタインモードの遠赤外レーザーを用いた協同散乱計測[3]や CO<sub>2</sub> レーザーを用いた位相コントラスト計測[4]、低域混成波の CO<sub>2</sub> レーザーを用いた協同散乱計測数少ない例があるのみである[5]。一方、TEXTOR[6]、ASDEXU[7]、LHD[8]などの加熱ジャイロトロンを備えた装置において、ジャイロトロンからの大電力ミリ波の協同散乱計測を試み、イオンの熱揺動に伴って集団的に運動する電子による協同散乱スペクトルの受信に成功し、ジャイロトロン周波数に対して上下数 GHz での散乱スペクトルの観測を行っている。熱的揺動レベルの小ささに起因する散乱断面積の小ささを補うために、1MW レベルのプローブビームを使用したことがその計測が可能になった大きな要因である。数 GHz 帯のイオンの熱揺動に付随した電子密度揺動レベルに対して、加熱波動に付随する電子密度揺動レベルは桁違いに大きく、特に静電波である EBW の場合には、伝搬する波動の持つエネルギーが直接密度揺動となって現れるため、プローブビームとして適当な周波数を選べば、散乱断面積を大きくすることが可能であると考えられる。

電磁波の散乱計測を適用して、EBW を直接検出し、モード変換、伝搬、減衰過程を調べることができれば、EBW を用いた加熱、電流駆動の最適化と、広いプラズマパラメータに対する適用性が期待できる。QUEST においては、電子バーンシュタイン波 (EBW による電流立ち上げと定常維持が計画の基幹となっている。しかしながら、これまで EBW の直接検出が困難であるため波動の励起、伝搬及び電流駆動の物理機構については理論的な予想、解析はあるが、実験的には必ずしも明確にはなっていない。この EBW の波動伝搬とその空間構造を直接検出し、その物理機構の検証と解明を行うことにより、電流立ち上げと定常維持を高効率・高性能化するのが本研究の最終目標である。当面必要な検討課題は、このために必要とされるプローブビームの性能と具体的

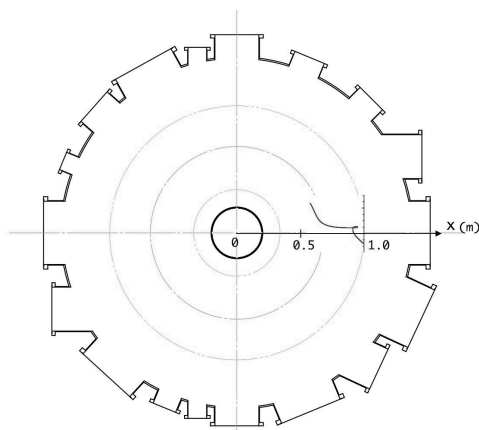


図 1. raytrace の一例 中心加熱・電流駆動に最適と考えられる  $N_{||}=0.56$  で入射した場合の ray 軌道を示す。

な散乱波検出配位、検出器構成を検討することである。

図 1 は、QUEST の赤道面断面図と raytrace コードで予想される O- X -B モード変換による 8.2GHz EBW 加熱時の中心加熱・電流駆動が期待できる  $N_{||}=0.56$  とした場合の軌道を重ねたものである。O-mode で入射した電磁波がプラズマ遮断層において X -mode に変換され、X -mode として伝搬する過程で高域共鳴層に近づいて静電波である EBW に変換される様子が示されている。この時の図 1 に示した x 軸方向に沿った主 半径方向とトロイダル方向の波数の変化を示したのが図 2 である。この図で解るように、EBW は半径方向に伝搬する過程で半径方向の波数が大きく変化しており、170GHz を散乱計測のプローブビームとして用いた場合に、観測できる散乱角 ( $60^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$ ) に対応する波数を実線で示した。入射電磁波が EBW に変換され、伝搬する過程の主要部分が 170GHz の散乱計測により計測可能であることが解る。しかしまた、散乱角  $180^\circ$  は、後方散乱を示しており、170GHz を使用する限りこれよりも高い波数の観測は不可能で、吸収過程を含めての観測はさらに周波数の高い電磁波の散乱を用いる必要があることも示している。このように、現在考えられている O- X -B モード変換による 8.2GHz の加熱電流駆動においては、170GHz を用いた散乱計測ではランチャー前面に近い領域での後方散乱を観測する必要があることが解った。

参考文献

[1] J. Sheffield, “Plasma Scattering of Electromagnetic Radiation” Academic Press.  
 [2] H. Laqua, Plasma Phys. Control. Fusion 49 (2007) R1–R42.  
 [3] H.Park et al., Rev . Sci. Instrum., 56 (1985) 922.  
 [4] C. M. Surko, et al., Phys. Rev . Lett. 43, (1979) 1016.  
 [5] E. Nelson-Melby et al., Phys. Rev . Lett., 90 (2003)155004.  
 [6] H.Bindslev et al., Phys. Rev . Lett., 97 (2006) 205005.  
 [7] FMeo et al., Proc. 36th EPS Conference on Plasma Phys. Sofia, June 29 - July 3, 2009 ECA M.33E, P-1.155 (2009).  
 [8] S. Kubo et al., Rev . Sci. Instrum., 81, (2010) 10D535.

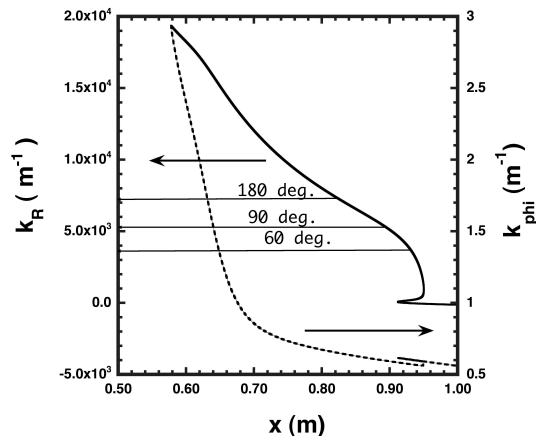


図 2. 図 1 に示した ray に沿った波数 ( $k_R, k_\phi$ ) の変化の様子。170GHz の電磁波が受ける散乱角 ( $60^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ ) に対応する波数を実直線で示した

## 24 特 3-4

光・ミリ波・マイクロ波を用いた海表面計測

Ocean Surface Sensing using Light, Millimeter and Micro-wave

独立行政法人 情報通信研究機構 統合データシステム研究開発室 灘井章嗣

### ・目的

光・ミリ波・マイクロ波を用いた計測は、測定対象に擾乱を与えずに測定することができるため、多くの分野で重要な計測手法となっている。最近では物理的に存在する対象を利用するだけでなく、屈折率の変化による散乱の利用や、位相測定による高空間分解能化など、新たな試みが進められており、遠隔計測の分野において主要な技術となっている。

現在、光・ミリ波・マイクロ波を用いた計測対象は、雲やエアロゾルの計測、海洋波浪や海上風等の海表面の計測、地形や土地被覆分類等の地表面の計測、プラズマでの散乱計測等多岐に及んでいる。一方、これまで計測手法にかかわる情報交換は、海表面の観測分野に限っても、あまり活発ではなかった。

本研究では、光・ミリ波・マイクロ波を用いた海面計測にかかわる全国の研究者が集い、対象分野を超えて知識や疑問を共有することにより、光・ミリ波・マイクロ波を用いた計測に関する理解を深めるとともに、新たな方法論の模索、応用対象の発掘を目指す。

### ・研究の具体的方法

年に一回程度、光・ミリ波・マイクロ波を用いた海表面計測にかかわる研究者が会し、研究打ち合わせを開催する。計測対象に関する議論よりも、計測手段について、自由な雰囲気のもと、知識の共有や、コミュニティの形成に力点を置く。これにより、計測の技術面を土台とした研究者間のつながりが形成できるように努める。

### ・今年度の活動

今年度は研究者代表者・分担者のスケジュール調整に手間取り、研究会の開催は出来なかったが、3月12日に研究者代表者・分担者で研究打合せを行う予定である。

#### 参加予定者

灘井章嗣 情報通信研究機構 主任研究員

江淵直人 北海道大学低温科学研究所 教授

林昌奎 東京大学生産技術研究所 教授

吉川裕 九州大学応用力学研究所 准教授

3月11日、12日に開催される「光・ミリ波・マイクロ波を用いた計測技術・解析モデルの開発とその応用に関する研究集会」で行われる発表のタイトルは以下のとおり。

- ・(仮題) シュトゥットガルト大学プラズマ研究所でのマイクロ波・ミリ波研究
- ・電磁波の協同散乱計測を用いたプラズマ波動の励起構造・熱化過程の検出
- ・LHD における協同トムソン散乱計測の開発と進展
- ・スポットライトモード SAR“Live SAR”を用いた地表画像取得実験
- ・海面からのマイクロ波後方散乱の時間領域シミュレーションとその応用
- ・ミリ波レーダ・ライダー・ウィンドプロファイラーによる、雲物理特性と鉛直流の研究
- ・マイクロ波パルスドップラーレーダによる海面観測
- ・海面におけるマイクロ波後方散乱過程と海上風観測
- ・LHD におけるマイクロ波反射計を用いた波動計測
- ・LHD における EBW 励起効率計算のためのモデリングと実験との比較
- ・位相配列アンテナによる熱輻射波計測

研究者代表者・分担者以外からも、海面からのマイクロ波後方散乱のシミュレーションなど、海表面計測に関係するテーマが予定されており、光・ミリ波・マイクロ波を用いた海表面計測手法の物理的な意味づけ、計測量から物理量への変換の高精度化への貢献が期待されている。

また、海洋との類似性が高い大気科学分野での発表も予定されており、海洋科学分野との強調も期待される。

## 24 特 3-5

### マイクロ波反射計・干渉計によるプラズマ中の高周波波動計測

東京大学大学院新領域創成科学研究科 江尻晶

#### 研究の背景と目的

プラズマ中の高周波波動電場は、電子の運動に影響を及ぼし、その結果、電子密度が変動する。一方、マイクロ波反射計は特定の密度（カットオフ密度）で反射される性質があり、プラズマの密度揺動を測定する手段として使用されてきた。これらを組み合わせることにより、高周波波動の電場測定が可能となる。これまで、いくつかの装置で適用されているが、定量的な測定の実績は少ない。一方、プラズマ中の波動電場を計測する手段は限られており、本手法は波動物理の解明と制御に非常に有用だと考えられる。そこで、本課題では、マイクロ波反射計を用いた波動測定手法を確立すること目標とした。本年度の具体的な研究目的として、LHD 装置においてイオン加熱用の高周波波動電場を測定するためのマイクロ波反射計の設計製作設置と実験を目的とした。

#### マイクロ波反射計

LHD プラズマは複雑な形状を持ち、送信した反射波が受信できる配位を探す必要がある。一方、送受信アンテナの位置は、種々の事情から自由度があまりない。そこで、鏡の向きをパラメータにして光線追跡を行いながら、想定するプラズマの配位群に対して反射波が期待出来る鏡の配位を決めた。図1に光線追跡の様子と設計製作後に真空容器内に設置した送受信アンテナの写真を示す。

真空窓からアンテナまでは、放射パターンがガウシアンビームで近似できるコルゲート導波管を用いるので、ガウシアンビームの伝送公式を用いて、ハードウェア上の制約の範囲でスポットサイズが比較的小さくなる鏡の位置や曲率を吟味した。

図2にシステム全体の構成を示す。マイクロ波部は二つのガン発振器と二つ

のミキサーからなるヘテロダイン方式であり、差周波数は約 900 MHz に設定される。プラズマへは 30.5 GHz のマイクロ波を二つのミラーを経由して正常波モードで入射し、約  $1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$  の密度層からの反射を同様に受信する。ミキシングしたのちの参照信号（プラズマを通らない成分）とプローブ信号（プラズマ中で反射された成分）を高速オシロスコープでデジタル化する。さらに、計算機上で数値ミキシングを行い、反射マイクロ波の Cosine 成分と Sine 成分を抽出し、解析に用いる。

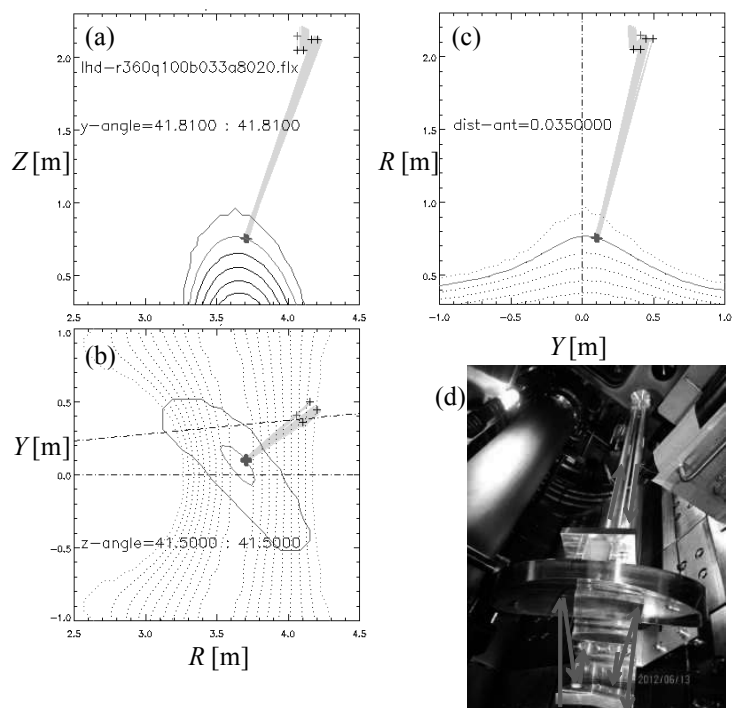


図1 : LHD プラズマの磁気面と光線の様子(a), (b), (c)。LHD の 3.5U ポートの真空側に設置された送受信コルゲート導波管と鏡の写真(d)。写真中の矢印はマイクロ波の伝搬方向を示す。

## 波動測定結果

マイクロ波反射計で測定される位相はプラズマの密度分布の変化を反映している。そこで、別の測定器（トムソン散乱装置、ミリ波干渉計）で得られた密度分布から反射計の信号を予想し比較したところ、比較的よい一致が得られ、反射計として機能していることが確かめられた。ただし、反射波の出現条件（出現時刻）が予想とずれていることが分かった。これは、屈折の効果により、実効的な反射面がわずかにずれることが原因であると考えられる。

LHDプラズマに数百 kW の高周波波動 ICRF（周波数 38.47 MHz）を入射した時の信号を以下のように解析し高周波波動の電場を求めた。

測定位置近傍のアンテナから数百 kW の高周波波動が放射されている場合は、反射計で測定した高周波成分（38.47 MHz）の位相振動は、rms で 0.01 rad.程度である。この時、反射波振幅の低周波揺動による変動の影響を抑制するために、ある程度の時間（約 6 ms）で平均した反射波振幅と高周波振動成分の振幅比から高周波位相振動を求めた。トムソン散乱装置等で求めた密度分布での反射波の位相を WKB 近似で求めて、位相振動の大きさを密度揺動の相対値に変換する。得られた相対密度揺動は 0.01 % 程度である。さらに、波動の分散関係等を用いてアンテナループ方向の高周波電場を評価した。この時、高周波波動の平行方向波数として  $6 \text{ m}^{-1}$  を仮定した。図 3 にいくつかのプラズマ放電での測定結果を示す。

図から測定小半径が増すに従って、高周波電場が大きくなること分かる（反射計の周波数は単一なので、密度分布が変化して測定小半径が変わることに注意）。

## まとめと今後の課題

マイクロ波反射計を組み上げて実験を行い、高周波電場を求めることに成功した。今後、様々な条件での測定を行うとともに、より多くのデータを取得できるようデータ取得系を改善する必要がある。

## 発表論文や学会発表

無し

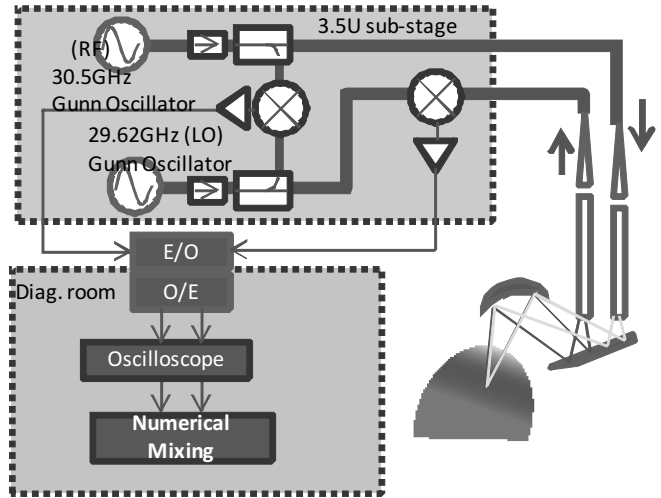


図 2 : 3.5U ポートに設置したマイクロ波反射計システムの構成。

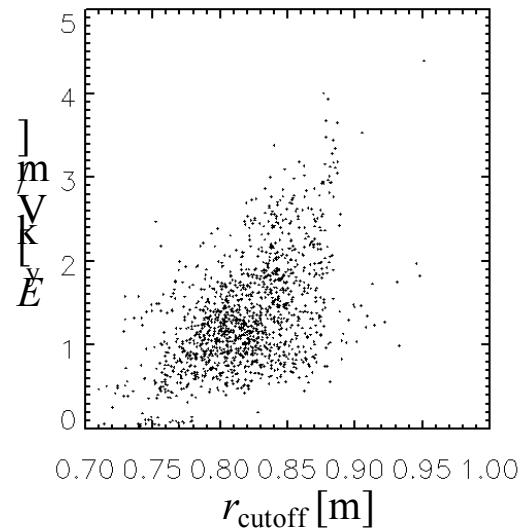


図 3 : 小半径と高周波電場の関係。

## 24 特 3-6

光・ミリ波・マイクロ波を用いた計測技術・解析モデルの開発と  
その応用に関する研究（研究集会）

九州大学 応用力学研究所 出射浩

3月に開催した研究集会のプログラムを以下に示す。

3月11日（月曜日）

- 13:00-13:15 ・研究集会開催にあたって（九州大学応用力学研 副所長 花田和明）
- 13:15-13:30 ・研究集会主旨説明（九州大学応用力学研 出射 浩）
- 13:30-14:30 ・High-power resonant diplexers: Development, tests and first applications on ASDEX Upgrade.（シュトゥットガルト大学プラズマ研究所 Walter Kasperek ）
- 14:40-15:25 ・電磁波の協同散乱計測を用いたプラズマ波動の励起構造・熱化過程の検出（核融合科学研究所 久保 伸）
- 15:25-16:10 ・LHD における協同トムソン散乱計測の開発と進展（核融合科学研究所 西浦正樹）
- 16:20-17:05 ・スポットライトモード SAR” Live SAR” を用いた地表画像取得実験（福岡工業大学 近木裕一郎）
- 17:05-17:50 ・海面からのマイクロ波後方散乱の時間領域シミュレーションとその応用（東京大学 吉田毅郎）
- 17:50-18:35 ・マイクロ波アクティブセンサを用いた生体計測とその応用（九州大学 間瀬 淳）

3月12日（火曜日）

- 10:00-10:45 ・ミリ波レーダ・ライダ・ウィンドプロファイラーによる、雲物理特性と鉛直流の研究（九州大学 岡本 創）
- 10:45-11:30 ・マイクロ波パルスドップラーレーダによる海面観測（東京大学 林 昌奎）
- 11:30-12:15 ・海面におけるマイクロ波後方散乱過程と海上風観測（北海道大学 江渕直人）
- 13:30-14:15 ・LHDにおけるマイクロ波反射計を用いた波動計測（東京大学 江尻 晶）
- 14:15-15:00 ・LHD における EBW 励起効率計算のためのモデリングと実験との比較（核融合科学研 伊神弘恵）
- 15:00-15:45 ・位相配列アンテナによる熱輻射波計測（九州大学 出射 浩）
- 16:00-17:00 ・全体討論
- 17:00-17:30 ・今後の進め方について

講演の主な要旨は以下の通り。

・「電磁波の協同散乱計測を用いたプラズマ波動の励起構造・熱化過程の検出」

(核融合科学研究所 久保 伸)

電磁波のコヒーレントな散乱を用いたプラズマ中の波動の励起・伝搬・吸収を直接検出する手法を紹介し、QUEST 装置の電子バーシュタイン波動(EBW)を例に議論した。当初、170GHz ジャイロトロンをプローブビームとして検討を開始したが、8.2GHz のレイトレースから予想される EBW の波数が非常に大きくなるため、後方散乱でも伝搬過程の途中までしか検出できず、CO<sub>2</sub> レーザーでは逆にほとんど前方散乱の領域で吸収が起り、空間分解ができなくなることが分かった。今後、検出器システムの周波数応答や出力の得やすさを考慮して、プローブビームの選択をする必要がある。

・「LHD における協同トムソン散乱計測の開発と進展」(核融合科学研究所 西浦正樹)

核融合プラズマ中の閉じ込められた高エネルギーイオンを計測するために、協同トムソン散乱計測装置の開発を行っている。メガワット級 77GHz ジャイロトロンをプローブビームとし、その散乱スペクトルからイオン速度分布関数を得ることが可能になる。協同トムソン散乱の受信系のアップグレード、プローブビーム品質の改善、得られたスペクトルの解析、今年度得られた実験結果について報告した。

・「海面からのマイクロ波後方散乱の時間領域シミュレーションとその応用」

(東京大学 吉田毅郎)

マイクロ波レーダを用いた海面観測のために、海面のマイクロ波後方散乱を時間領域で求めるシミュレーションツールの開発を行った。マイクロ波レーダを用いた水槽実験と比較することで、本シミュレーションの有効性を確認した。また、シミュレーションの応用として、パルスドップラーレーダを用いたレーダ画像や合成開口レーダ(SAR)画像へとシミュレーションを発展させた。今後はSARを用いた海面高度計測における波浪の影響を評価するためにシミュレーションを活用する予定である。

・「マイクロ波アクティブセンサを用いた生体計測とその応用」(九州大学 間瀬 淳)

マイクロ波を用いたアクティブな生体計測について報告した。アクティブな計測法では、被験体に入射波を照射し、透過波、反射波、あるいは散乱波を測定するが、生体測定という特性から、反射波の測定を中心として記述した。反射波信号は交流成分と直流成分に分類され、前者はバイタル信号など生体の動的な活動に基づいた情報を提供する。バイタル信号の揺らぎは被験者の様々な状態を反映し、健康管理、ストレス評価などへの適用が期待される。一方、直流成分は、マイクロ波の透過特性を利用した、生体内部イメージングとして発展し、乳がん検出を目的とした胸部イメージングへの実用化が期待されている。

・「ミリ波レーダ・ライダ・ウィンドプロファイラーによる、雲物理特性と鉛直流の研究」

(九州大学 岡本 創)

ミリ波レーダとライダの雲観測の歴史、特に初期から現在までの国内外の各研究機関における状況について簡単に振り返った。次ぎに、理論的背景として、レーダ方程式、ライダ方程式と、そこに現れる雲やエアロゾルの微物理特性との関係について、実験室データや、航空機による現場観測データを紹介しながら、解説した。地上と船舶におけるミリ波レーダとライダによる雲同時観測と解析の結果を紹介した。それらを発展させた形で、人工衛星に搭載されたこれらの測器のそのデータの解析の現状について紹介した。さらに、雲度プロファイラを、ミリ波レーダによるドップラー速度、ライダ観測との同時観測データと解析の状況、期待される事などについても述べた。また、解析に必要な電磁波の散乱理論についても解説を行った。

・ 「海面におけるマイクロ波後方散乱過程と海上風観測」 (北海道大学 江渕直人)

海面からのマイクロ波後方散乱のメカニズムおよび、その応用として、衛星搭載マイクロ波散乱計によって海上風速・風向を観測する原理について紹介した。海面におけるマイクロ波の後方散乱については、マックスウェル方程式の近似解と海面形状の統計的性質を結びつけた概念モデルがいくつか提案されており、室内実験、航空機実験、衛星観測などによって得られた海面からのマイクロ波後方散乱の特性を定性的にはよく説明することが知られている。しかしながら、観測値を定量的に説明できるモデルはなく、実際の風速・風向算出には、経験的手法によって導出されたモデル関数が用いられているのが現状である。

・ 「LHDにおけるマイクロ波反射計を用いた波動計測」 (東京大学 江尻 晶)

マイクロ波反射計で高周波波動の誘起する密度振動を測定し、波動電場を求めることができる。そのためには、反射計で位相振動を測定するとともに、密度分布、分散関係を精度よく求める必要がある。LHDにおいて、ICRFアンテナ近傍の計測を行うために30.5 GHz マイクロ波反射計を設計し、3.5Uに設置し実験を行った。光線追跡、ビーム伝搬設計を行い、反射計として正常に動作することを確認した。波動由来の密度揺動レベルは0.01%程度で電場は1 kV/mのオーダーである。反射面が外側に行くほど電場が強くなる傾向があり、3.5U反射計は7.5-ICRFよりも測定点近傍の3.5-ICRFアンテナのパワーに強く依存する。

・ 「LHDにおけるEBW励起効率計算のためのモデリングと実験との比較」

(核融合科学研 伊神弘恵)

電磁波モードの伝播密度限界を越えた高密度プラズマの電子サイクロトロン加熱に、伝播密度限界の無い磁化プラズマ中の静電波モード(電子バーンシュタイン波:EBW)を用いるため、EBWと電磁波モード間のモード変換過程を含んだ波動伝播を数値計算するためのモデリング手法を研究している。大型ヘリカル装置のEBW加熱実験結果と数値計算による予測には高モード変換効率が得られる入射角度に関して約4度の乖離があり、その要因の解明が課題となっている。

・ 「位相配列アンテナによる熱輻射波計測」 (九州大学 出射 浩)

プラズマの加熱・電流駆動実験に向け、入射ビームの指向性制御のための位相配列アンテナが開発されている。EBW 実験ではモード変換のために有効な入射角度範囲は狭い。プラズマからの熱輻射は、加熱・電流駆動のための入射と逆過程を経て、狭い放射角範囲で観測されるため、EBW 実験でのモード変換機構解明には、熱輻射計測が重要となる。熱輻射は連続な周波数スペクトラムを持ち、非コヒーレント波であるため、応力研での位相配列アンテナによる受信例が紹介された。SAT に類似した他の方式による英国の他研究機関での試みも報告された。

全体討論では、今年度の研究集会を踏まえて、来年度、どのように進めるか議論された。議論の中では、

1. まだ、十分に話を聞けていないので、同じ形式の研究会を続けてはどうか
2. 共通な課題等を取り上げて、課題を議論するような研究会は設定できないか
3. 設備や実験の様子を知りたいので、九大以外で研究会が持てないか

などといった意見があった。まず、各々の研究課題で、周波数や、モデリング、解析手法、課題等を表にまとめることから始め、参加者に今回の研究会で興味を持った内容や、話を聞きたい内容なども含めて意見集約することとした。項目2を考えながら、項目1、3を進めることとし、共同研究者以外からも講演いただくことを考え、メールベースで来年度の研究集会の進め方を模索することとした。

## 24 FP-1

### QUEST 装置における VUV 分光法によるオーミック放電での不純物の振舞いに関する研究

核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・森田繁

課題番号：24FP-1

研究課題：QUEST 装置における VUV 分光法によるオーミック放電での不純物の振舞いに関する研究

研究期間：H24 年 4 月 1 日－H25 年 3 月 31 日

所内世話人：図子秀樹

協力者：4 名（図子秀樹, Santanu Banerjee, 董春鳳, 王二輝）

配分額：研究費（5 万円），旅費（10 万円）

#### 目的：

磁場閉じ込め装置・QUEST の不純物挙動を VUV 分光計測法を用いて調べる．特に希ガス（ネオン）のリサイクリングについて知見を得ることにより，プラズマ制御に関する知見を与える．

#### 実施方法：

QUEST 装置に背面照射型 CCD 検出器付 20cm 直入射真空紫外分光器を設置し，300-3000 Å 域に存在する不純物発光線を観測する．計測に支障のない硬 X 線の少ない放電を見つけ，ネオンをパフし実施する．

#### 実験結果：

不純物の時間変化を調べるために，硬 X 線の除去を目的として低プラズマ電流の非誘導プラズマ生成を行った．結果として垂直磁場 ( $B_z$ ) を減少させると比較的エネルギーの高い電子の捕捉軌道が悪くなり，硬 X 線を発生させる前にプラズマから完全に散逸し，ほぼ完全な形で分光計測が可能となることが分かった．図 1 にその結果の一例を示す．上図が高  $B_z$  磁場 ( $R=0.5m$  付近で 160G)，下図が低  $B_z$  磁場 (10G) 放電時の VUV スペクトルを示す．高  $B_z$  磁場の場合にはスペクトルが硬 X 線からの CCD

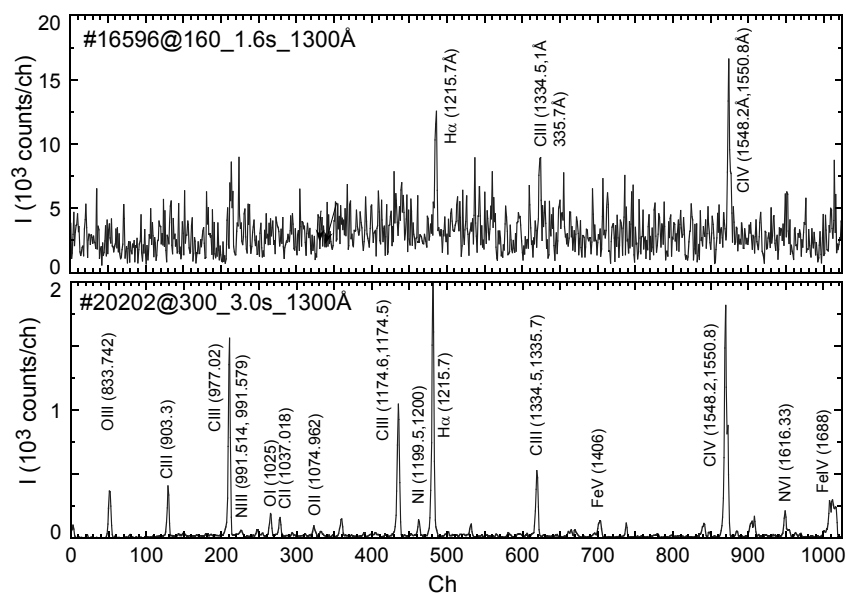


図 1 R=0.5m 付近での  $B_z$  磁場 160G (上) 及び 10G (下) での VUV スペクトル比較.

ノイズではほぼ隠れており、時間変化を観測することは不可能であった。Bz を低磁場にすると完全にノイズを消去することが可能になり、不純物の振舞いを観測できる準備が整った。

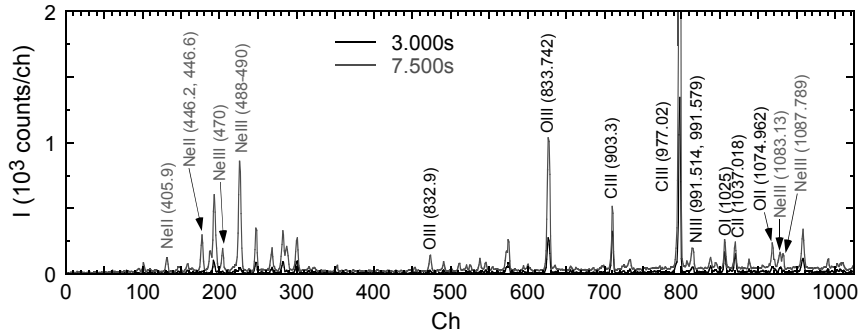


図2 ネオンパフ (4.0s) 前後での VUV スペクトル変化 (赤：ネオンパフ後)。

ネオンを放電途中にパフし、リサイクリングを観測する実験を行った。ネオンは  $t=4s$  に数 ms 程度の間パフしており、 $I_p=5kA$ ,  $P_{ECH}=40kW \times 2$  であった。ネオンパフの前後でのスペクトルの変化を図2に示す。これらスペクトル線を解析することにより NeII, III 及び IV のネオンスペクトルと思われるスペクトル波長と遷移を特定した。残念ながら NeV ( $Ne^{4+}$ ) 以上の価数は観測されなかった。NeIV の電離エネルギーは  $77.5eV$  であり、これまでに観測している他の不純物価数から推測して妥当な結果である。また、スペクトル線の価数分布も Bz の大小によらず大きくは変化しなかった。少なくともバルクの電子温度は Bz に鈍感であることが推測できる。

この種の放電を用いて不純物スペクトルの時間変化を QUEST で始めて計測することができた。結果の一例を図3に示す。上図は分光器の中心波長を  $1600\text{\AA}$  に、下図は  $800\text{\AA}$  に設定し観測した。水素の振舞いを代表する  $Ly\alpha$  線は  $4s$  でのネオンパフの有無に関わらず全く変化しない。また、炭素、酸素及び鉄等の不純物もネオンパフと同時に少し増加するが大きな変化ではない。しかしながら、数 ms 間のネオンパフ後、ネオンは放電時間の経過と共に増加し続け、おおよそパフ後 2-3 秒後に定常値を取る。しかし、定常に到達した後も減少する気配はない。  $t=7s$  辺りで突然不純物スペクトル強度が増大しているが、現在のところ原因は定かではなく詳しい解析を必要とする。

#### 今後の課題と予定：

低 Bz 放電を使用して初めて不純物の時間変化を観測することができ、今後の共同研究に向け大きな進展となった。次回はヘリウム等、異なったガスを用いてリサイクリングの研究を行い、水素放電との比較を行う予定にしている。放電の定常維持に向け、プラズマ壁相互作用等に関する知見が得られることを期待している。

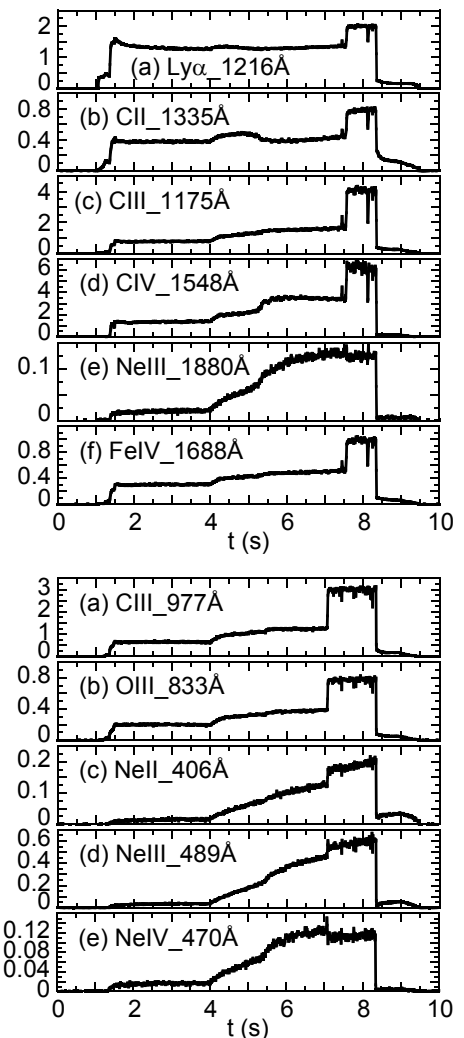


図3 ネオンパフ (4s) 時の各種不純物の振舞い (上：#20189, 下：#20201)。

## 24 FP-2

### 透過プローブを用いた水素リサイクリングモニタの開発

京都大学工学研究科・高木郁二

課題番号：24FP-1

研究課題：透過プローブを用いた水素リサイクリングモニタの開発

研究期間：H24年4月1日－H25年3月31日

所内世話人：関子秀樹

協力者：5名（古田美憲、関子秀樹、Sanjeev Kumar Sharma, A. Rusinov, 井上雄貴）

配分額：校費（5万円）、旅費（15万円）

#### 目的：

QUESTの水素リサイクリングモニタの構築と粒子バランスの局所・定量評価法の確立を目指す。特に壁粒子吸蔵と放出の遷移条件の背景物理を調べるために、透過束の実測と拡散・再結合方程式の数値解により、壁への水素束モニタの開発を行う。これまでのNi, Pd薄膜での透過計測に加えて、新たにPdCu合金を用いた水素プローブを試作し、高感度検出器の開発を目指す。

#### 実施方法：

QUEST装置並びにプラズマのリサイクリングの研究のために高感度プローブを試作する。これまで固定位置に設置したNi, Pdメンブレン透過プローブ（直径16φ）を用いて水素束の絶対評価と時間応答計測を行ってきた。しかし、設置場所が壁より奥まっていたこともあり、通常実験中の中性粒子が少ない状態では感度が十分ではなかった。本年度は水素ガス純化装置に用いられているPdCu薄膜を真空中で使用可能なプローブ（直径30φ、長さ80mm）として新たに開発し、それを下部ダイバーター板上のプライベート領域に設置し、透過probe部から直径13mm長さ60mmのベローズパイプで放電管外部に引き出し、長さ約6mの延長パイプ、四重極残留ガス分析器、真空ポンプからなる分析部で分析する。感度はHe標準リークを用いて校正する。

#### 実験結果：

##### 1) PdCu透過プローブの試作

真空容器内壁に入射する局所水素原子束を評価するため図1に示すPdCu薄膜(厚さ22μm 直径30mm 長さ82mm)のPDP probeを試作した。これは水素ガス純化装置に用いられるものであり、真空中で利用可能なように薄膜の内外両面を穴あきステンレス(透過率49% 穴径1.5mm)で保護している。内部にヒーターを内蔵するがヒーター線は大気のままベローズパイプで放電管外部に引き出している。真空トラブルの場合は全体を粗挽きし作動排気が行える構造である。使用温度は放電管が100度でbakingされており、それが下限であり、上限は400度である。ヒーター温度は熱電対でモニターしPID制御により1度以下に保持される。ただし、実験中

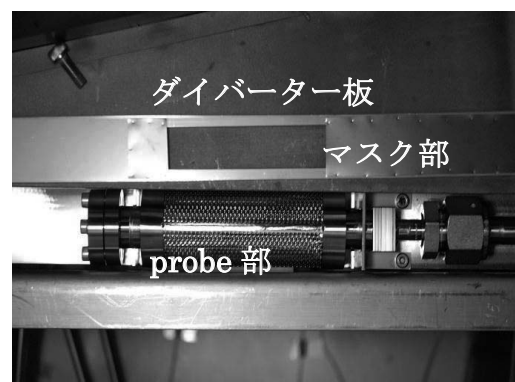


図1 下部ダイバーター板に設置したPdCu透過プローブ

の PdCu 表面温度はモニターしていない。PdCu 薄膜を透過した H<sub>2</sub> ガスは 3/8 パイプにて同じく真空容器外にベローズパイプで取り出し、バルブ、絶縁管を経てガス分析部に導かれる。この位置に校正用 He 標準リークが置かれている。下流側に約 6m の配管のうち水素透過量を QMA (Quadrupole mass analyzer: 四重極型質量分析計) で測定する。

図 2 に ECR 放電洗浄プラズマにおける透過束計測結果 (青色曲線) を示す。放電時間は 30 分であり約 100 秒で飽和し、定常状態となる。放電後はほぼ同じ時定数で減少する。定常状態で観測される上下の揺らぎは放電中にトロイダル磁場を掃引したことによるプラズマからの Ha 強度の振動に対応している。PdCu は再結合律速の金蔵であり水素濃度  $C(t)$  は上流、下流の再結合係数をそれぞれ  $K_u, K_d$ 、入射束を  $F_{in}$  とすると

$$L \frac{dC}{dt} = F_{in} - (K_u + K_d) C^2$$

の解として与えられる。定常状態では透過束は簡単に

$$F_{pdp} = F_{in} \frac{K_d}{(K_u + K_d)}$$

と与えられる。ここで  $K_u = K_d$  の場合には約半数が透過束として検出できる。図中の赤線は初期境界条件として再結合律速を与え拡散方程式を解いた場合の解を示している。ここで  $K_u, D$  は T=500 度の文献値を用い、 $K_d$  は定常状態の近似解から与えた。

## 2) 定常プラズマにおけるダイバーター部の H 原子透過計測

QUEST で行っている高周波による電流駆動と定常運転プラズマにおいて水素原子透過束を計測した。図 3 にその結果とリサイクリングの指標として利用する Ha 強度の時間発展を示す。この量はガス注入量とリサイクリングによって決まるが、この放電の場合は約 100 秒からリサイクリングが増大し、駆動電流が減少する。100 秒までは、入射束を  $H_a(t)$  として  $1 \sim 1.8 \times 10^{17} \text{ H/m}^2/\text{s}$  を与えると図の赤曲線 ( $0.2 \times 10^{17} \text{ H/m}^2/\text{s}$ ) のようによく一致した。しかしながら 100 秒後は大幅に増大し、パルス終了時には  $1.7 \times 10^{17} \text{ H/m}^2/\text{s}$  に達した。入射束を  $H_a$  とすると  $5 \times 10^{17} \text{ H/m}^2/\text{s}$  でもこの値は  $0.7 \times 10^{17} \text{ H/m}^2/\text{s}$  にしか達しなかった。この理由として 1)  $H_a$  がダイバーター部を見ているのではないこと、2) ダイバーター板や PDP プローブ表面温度の上昇が考えられる。

参考文献

[1] S.K.Sharma, I. Takagi: JNM 420 (2012) 83-93 [2] 井上雄貴, 高木郁二他、P 核学会九州支部会 2012 12

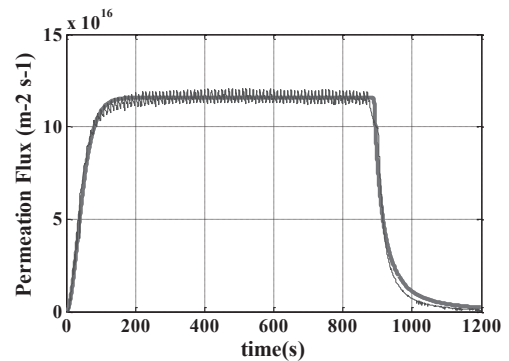


図 2 放電洗浄プラズマにおける PdCu プローブの H 透過曲線 (青色)。拡散方程式を再結合律速の初期境界条件で解いた解 (赤色) を同時に示す。  $K_u, D$  は文献値を用いた。

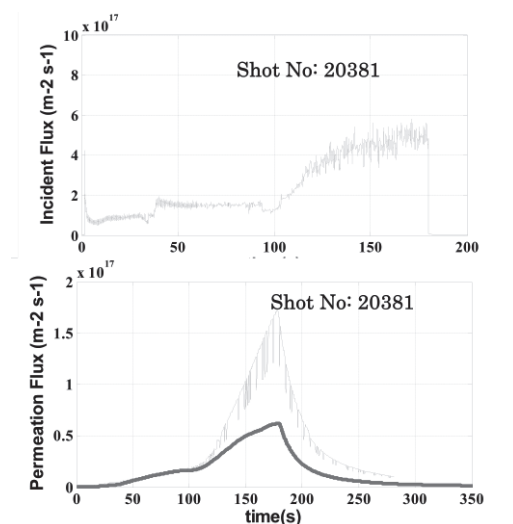


図 3 3分間プラズマにおける (上) 水素発光強度の時間変化、(下) 水素透過曲線 (青色) および数値計算結果 (赤色) 入射フラックスとして水素発光強度の時間変化を用いている。

## 1. 目的

各種原子炉や高温プラントで使用される構造材高温使用限界温度を決めるのは、多くの場合熱クリープ特性であると考えられている。高温クリープ変形の抑制には強化手段として用いる析出、粒子分散、加工転位などの変形過程における挙動の理解が不可欠である。申請者のグループではこれまで、Cr-W フェライト鋼、バナジウム合金を中心に研究を進めてきたが、高温強度を上昇させる方法として、析出強化法とナノ粒子による分散強化法を検討している。本研究では、Cr-W フェライト鋼、バナジウム合金においてナノ粒子分散により強化した材料の高温クリープ変形試験を行い、試験後の透過電子顕微鏡による組織観察により、変形過程における分散粒子の発達、結晶や転位構造の変化を求め、強化法の有効性と一層の特性向上に向けての指針を得ることを目的とする。平成 24 年度はバナジウム合金について重点的に研究を進めた。

## 2. 方法

V, Cr, Ti, Y, TiC, SiC,  $Ti_3SiC_2$  のそれぞれ粉末を V-4Cr-4Ti-1.5Y-0.3XC となるよう調整し、遊星ボールミルにより WC/Co ボールを用いメカニカルアロイング (MA) を行った。ボールと材料の重量比は約 5 : 1 であった。管封入の後、1000°C 3 時間、アルゴン雰囲気での HIP 処理し、その後 1200°C, 1 時間の熱処理を施した。試料を九州大学応用力学研究所の透過電子顕微鏡 (TEM) により観察するとともに、SEM, EDS, XRD により塑性・構造評価を行い、さらに高温引張り、クリープ試験を実施した。

## 3. 結果と考察

図 1 に V-4Cr-4Ti-1.5Y-0.3TiC の MA の進行による SEM-EDS 組成面分析結果を示す。時間の経過とともに、Cr の溶解が進みその後 Ti が溶解する様子が分かる。これに対応して格子定数を測定した結果を図 2 に示す。V (原子半径: 0.132nm) のマトリックスにおいて、Ti (原子半径: 0.143nm) は格子定数の増加、Cr (原子半径: 0.125nm) は格子定数の減少をもたらす。図 2 において格子定数が一旦減少してから増加に転ずるのは、図 1 で示した元素別の段階的な溶解と対応している。

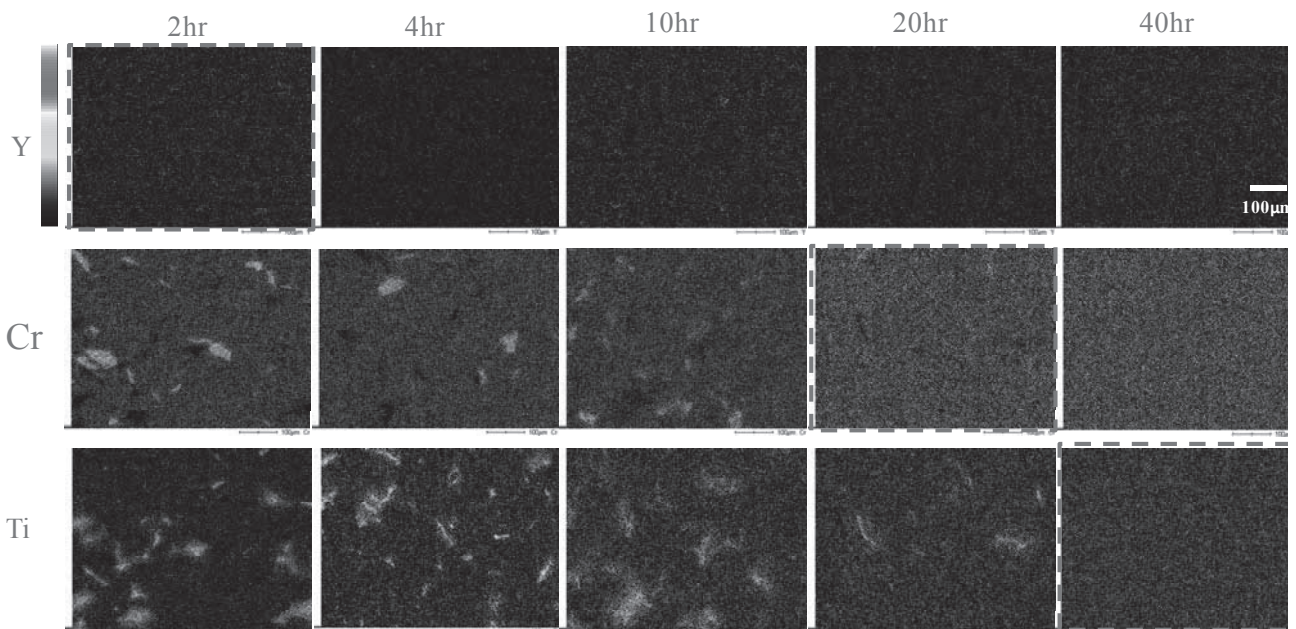


図 1. V-4Cr-4Ti-1.5Y-0.3TiC の MA の進行による SEM-EDS 組成面分析結果

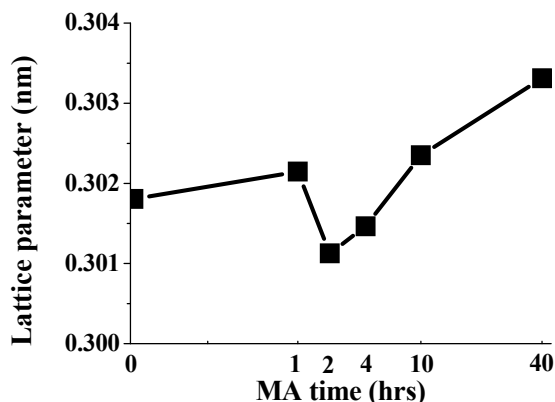


図 2. V-4Cr-4Ti-1.5Y-0.3TiC の MA の進行による格子定数の変化

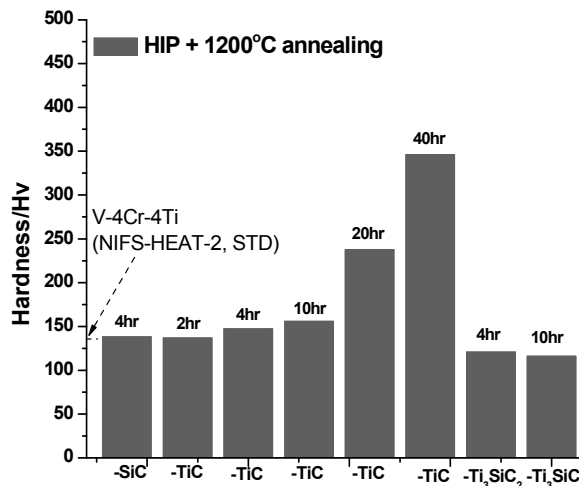


図 3. 各試作合金の硬度

図 3 は、各試作合金の硬度を比較したものである。V-4Cr-4Ti-1.5Y-0.3TiC については、図 2 で格子定数が増加する 10 時間以上において硬度が増加し、Ti の溶解により強化が進んでいることが分かる。他の添加合金の硬度はこれよりも低い値にとどまっている。

図 4 は、V-4Cr-4Ti-1.5Y-0.3TiC の (a) HIP のみ、(b) HIP 後 1200°C、1 時間熱処理の TEM 組織の比較を示す。熱処理により、分散粒子の密度が高まった様子が分かる。

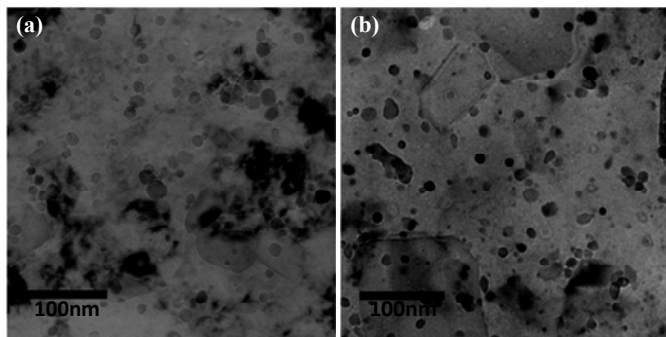


図 4. V-4Cr-4Ti-1.5Y-0.3TiC の (a) HIP のみ、(b) HIP 後 1200°C、1 時間熱処理の TEM 組織比較

本研究より、V-4Cr-4Ti-1.5Y-0.3TiC が有望な組成であること、MA は Cr の溶解、Ti の溶解の順に進み、Ti の溶解により強度が増加すること、HIP 後熱処理によりナノ粒子密度を高められることなど、V-4Cr-4Ti の MA による強化の可能性とその機構が明らかになった。高温引張り、クリープ試験については引き続き研究を進める。

#### 4. 研究組織

室賀健夫、長坂琢也（核融合科学研究所）、鄭鵬飛（総合研究大学院大学）  
渡辺英雄、荒木邦明（九州大学応用力学研究所）

#### 5. 国際会議での発表

##### (1) Development of nano-particle dispersion strengthened vanadium alloys

Zheng Pengfei, Nagasaka Takuya, Muroga Takeo, Chen Jiming

11th China-Japan Symposium on Materials for Advanced Energy Systems and Fission & Fusion Engineering, Sep 10-14 2012, Chengdu Sichuan, China

## LHD 第一壁トロイダルアレイ試料による対向材料の損耗/損傷 および水素同位体捕捉量分布の評価

核融合科学研究所 ヘリカル研究部 時谷 政行

### 【目的】

核融合科学研究所の大型ヘリカル装置(LHD)のプラズマ対向壁は、SUS 製第一壁と炭素製ダイバータタイルで構成されている。LHD は 3 次元ヘリカル構造であるため、対向壁の構造も複雑であり、それ故、材料の損耗・再堆積の物理特性も、場所によって大きく異なることが以前より考えられてきた。昨年度の実験では、第一壁上に連続したトロイダルアレイ試料(SUS と Si)を設置し、表面分析実験を実施したところ、第一壁損耗の主要因はグロー放電洗浄であり、トラス外側第一壁ではそのスパッタリング損耗率が、Fe, C を主成分とする不純物元素の堆積率を凌いでいるために、本来の金属表面がほぼ維持され続けていることが明らかになった。

このような背景の下、2011 年度の LHD 実験終了後、閉ダイバータドーム下(9-I セクション)を観察したところ、多量の堆積層がフレーク状に形成されていることが確認された。LHD の閉ダイバータ排気システムは、図 1 に示すダイバータ受熱板とドーム構造で構成される。ドーム下にはクライオポンプが設置されダイバータ排気を行うこととなっている。9-I 構造部には未だクライオポンプが設置されておらず、ドーム下における PWI 特性の研究が継続して実施されている。フレーク状堆積物は図 1 の赤い四角で囲んだ領域で確認された。このような堆積物がクライオポンプの排気口に蓄積され続けると、排気効率の現象をもたらすことが考えられる。また、堆積物は剥離し易い構造のため、ダストとなってプラズマ中に混入する可能性もある。今年度は、昨年度に明らかになった外側第一壁の PWI 特性と比較を行うために、ドーム下のフレーク状堆積物の材料物性を明らかにすることを目的とした。

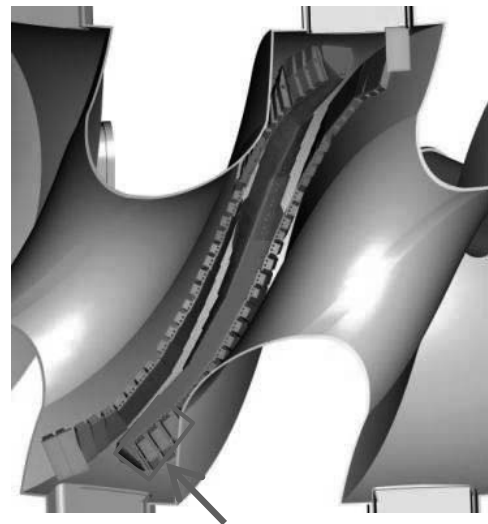


図 1 LHD 閉ダイバータ構造 CAD 図  
黄色部：ダイバータ受熱板，緑色部：ドーム構造

### 【実験方法】

堆積物の物理特性を調べる目的で、2011 年度実験サイクル後に、フレーク状堆積層を九州大学応用力学研究所に運び、その微細構造を集束イオンビーム加工観察装置(FIB)と透過型電子顕微鏡(TEM)を用いて観察した。FIB によるナノ加工と TEM による微細構造観察を組み合わせることで、フレーク状堆積層の断面の詳細な構造解析を行うことができる。表面構造については、走査型電子顕微鏡(SEM)とそれに付設されているエネルギー分散型 X 線分析装置(EDX)を用いて評価した。

### 【結果および考察】

図 2(a), (b)に、実験サイクル後にドーム下で確認された堆積物の場所と写真を示す。図 3(a)

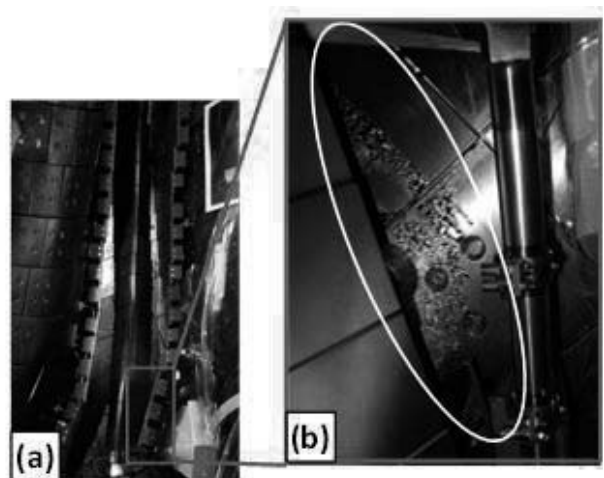


図 2 2011 年度実験サイクル後に 9-I 閉ダイバータ構造ドーム下に形成されたフレーク状堆積物

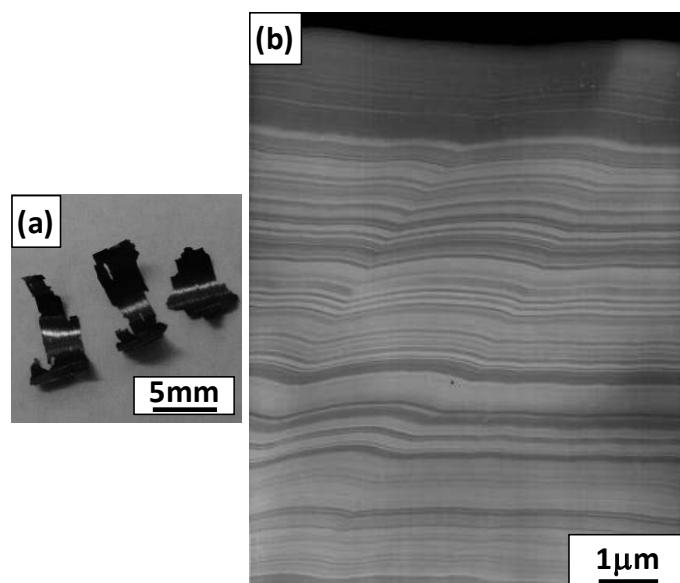


図3 図2(b)に示したフレーク状堆積物の写真(a)と、その断面 TEM 像(b)

に、採取したフレークの拡大写真、図3(b)にその断面 TEM 像を示す。図3(b)において明るく見える部分は炭素が主成分、暗く見える部分は Fe が主成分の層であり、組成の異なる堆積層の形成が無数に繰り返された Mixed-material 構造であることがわかる。Fe を含む Mixed-material 堆積層は機械的に脆いため、数多くのフレークがこの場所で形成されたと考えられる。ドーム下においてなぜこのような構造となるのかについては今後のさらなる解析が必要である。図3(b)を見てわかるように、大部分の層は炭素を主とした構造である。この場所のダイバータ受熱板が受ける熱/粒子負荷は、閉構造ダイバータ受熱板の中で最も高く、炭素製受熱板のスパッタリング損耗率が他の受熱板よりも高いことがわかっている。したがって、炭素材料のスパッタリング損耗量を抑制しなければ、堆積物の形成、フレークの発生は抑えられないことが示唆された。そこで、2012 年度のサイクルでは、図2(a)赤枠内の3枚のダイバータ受熱板をタングステン被覆炭素タイルに交換し、1 実験サイクル間プラズマ実験に曝露した。その結果、図4に示すように、ドーム下へのフレークの形成を完全に抑えることができた。しかしながら、タングステン被覆層は、ダイバータストライクポイントに沿って激しく溶融および損耗しており、下地の黒鉛基盤まで激しく損耗を受けていた。また、溶融層の周辺部では幅 0.1mm 以下の緻密なクラック網の形成が確認された。次期実験サイクルはこのままの状態で使用できないほどの損傷を受けていたが、黒鉛基盤が見えている程の損耗を受けていたにもかかわらず、ドーム下への Mixed-material 堆積層(フレーク)の形成は抑制されていたことから、ストライクポイント以外の健全なタングステン被覆層の存在がフレークの抑制に重要な役割を果たしていると考えられる。今後は、溶融層の構造解析、タイル表面の堆積層分布及び捕捉水素量の分布について解析を進める。

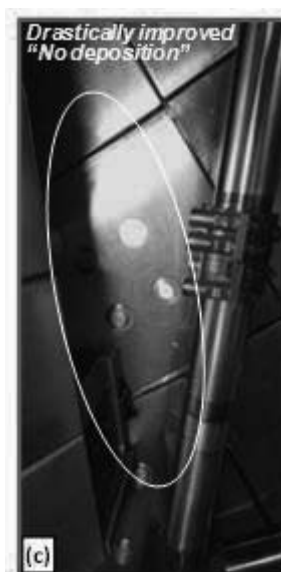


図4 2011 年度実験サイクル後の 9-I 閉ダイバータ構造ドーム下の状態。

## 24 FP-6

### 核融合プラズマ中における熱流束と渦度流束の時空間的非局所性に関する研究

原子力研究開発機構 徳永晋介

#### 1. 目的

核融合プラズマのマーヅナルな閉じ込め性能を決定する乱流輸送機構は、核融合炉の効率向上を目指し改善閉じ込めを活用した先進オペレーションシナリオを構築してゆく上で、その理解が求められる最重要テーマの一つと言える。本研究はプラズマ中に励起されるドリフト波乱流と、それが駆動する(1)温度分布の緩和および(2)帯状流の励起の”二つ”が、競合しながらそれぞれ別チャンネルから乱流にフィードバックする点にフォーカスし、プラズマのマーヅナルな輸送を決定するグローバルな構造に上記三者の関係が与える影響を調査するものである。

#### 2. 方法

##### 1. 渦度流束・熱流束の時間的非局所性

Flux driven のグローバル ITG シミュレーション結果を用いて、渦度流束、熱流束の自己相関に関する解析を行う。長い相関時間を持つ帯状流や輸送とのマルチスケール相互作用が、乱流輸送に記憶効果を持ち込み、乱流輸送を質的に変化させる可能性に関して検討を行う。また Collisionality など、帯状流の減衰や分布緩和の時定数を変化させるパラメータへの依存性を調査する。また、帯状流-乱流もしくは温度分布緩和-乱流の相互作用の一方を人為的に切る数値実験を行い、結果の比較研究を行う。記憶効果を取り入れた非線形マルコフ過程やマルコフチェーンモデルに当てはめた物理モデリングの可能性を検討する。

##### 2. 渦度流速・熱流束の相互相関と空間的非局所性

渦度流束と熱流束の相互相関、静電ポテンシャル・渦度・温度揺動間の位相差に関する解析を行う。特に ExB staircase と呼ばれる、中間スケールの多重セル構造の形成が見られる結果を得て、その構造と渦度流束との関連などについて調査を行う。定常な散逸構造としての ExB staircase と熱・渦度流束の関係を、potential vorticity の均一化という文脈から議論することで、核融合プラズマ中で帯状流シニアが一部に集中して効率的に形成されるための本質的な条件を模索する。

#### 3. 結果

共同研究採択後の著者の異動により、九州大学応用力学研究所計算機へのリモートアクセスが大幅に制限される状況（職場からのアクセスが不可能）となったため、共同研究を応募当初の計画に則って進めることは極めて困難となった。

上記の理由により、グローバル乱流輸送コードおよび解析コードの整理・近代化改修・改良作業までしか及ばず、期限内に学術的結果を得るに至らなかった。コード修正作業は進捗したもの、前節まで

に述べた計算・解析作業は今後の課題として繰り越さざるを得ない。本報告書では主に応力研計算機システムの助力を得て今年度に行うことが出来た乱流輸送コード・解析コード開発の進展の概略について述べ、物理研究の進捗については現在進行中の作業に言及するにとどめる。

#### コード開発の進捗、研究の現状

本共同研究では旅費等の採択は無く、また前述した事情により SINET 等の高速回線も利用できなかったため、一般回線経由で遠隔作業を効率的に行うには計算・解析結果の作図・閲覧に伴う通信を軽量化する必要があった。従来用いていた Fortran から呼び出すグラフィックライブラリに替えて、Fortran が出力したバイナリデータを読み込んでローカルで処理を行う解析・作図コードを Python で開発した。また、それに合わせた輸送コード側の出力変更と、Fortran90 化作業も行った。Fortran90 で記述された輸送コードと Python による解析コードを用いた遠隔での作業手法確立は、今後のコードの保守性と研究効率を大きく高める結果となった。

これまで主にベクタ計算機である応力研の SX-9F 上で並列計算を行って来た乱流輸送コードを、京や IFERC CSC の Helios 等に代表される大規模並列スカラ計算機の時代に合わせてゆくコード改修・最適化が必要なため、応力研の Cray XT4 上でのコードチューニング作業に着手した。メモリを共有するノード内での OpenMP を用いた並列化を行った。線形計算の結果は良好に得られたが現状ではまだ計算効率に大きな改善は見られず非線形計算は荷が重い。現在行っている 3 次元ループの組み換え作業を継続する必要がある。また流体モデルに基づく現状の乱流輸送コードでは、スペクトル法を用いているためモード数や並列プロセス数の増加によって通信量が大幅に増大する傾向があり、スケーラビリティに制限があることも原因と考えられる。擬スペクトル法を採用して通信量の増大を抑制する改良が今後必要である。

本共同研究の眼目であった熱流束・渦度流束の解析には、冪上則に従う広い周波数帯域の振る舞いを見るために高い時間解像度かつ長時間の時系列データが必要となるため、その算出とデータ圧縮・出力を行う輸送コードの修正と解析コードの開発を行った。しかしながら当該データは数ギガバイトの容量となり現状では転送が困難なため、解析作業の実行には今後こちら側の接続環境の改善を待つ必要がある。当初の関心事であった熱流束・渦度流束の関係を検討する上で帯状電場と帯状圧力場の変動を結び付ける Geodesic Acoustic Mode (GAM) の影響を吟味する必要があるが、従来のモデルではエネルギー方程式における磁場曲率・勾配ドリフトとの結合項が欠けていることから GAM が強く励起され過ぎる傾向があったため、コード上でのモデルの入れ替えを行った。

#### 4. 研究成果報告

なし

## 24 FP-7

### 金属材料の光学特性および電気伝導特性に与える低エネルギーイオン照射の影響

島根大学大学院総合理工学研究科 宮本光貴

#### 1. はじめに

イオン照射された材料の表面特性変化は、核融合プラズマ対向材料のみならず、プラズマプロセスや固体物性、真空工学の分野においても重要な課題であり、現象の理解に関する多様な研究がなされている。我々は、これまでイオン照射された材料の劣化程度を非破壊で簡便にその場診断する手法の最適化を最終目的として、照射下での金属ミラー材の光反射率変化を、損傷組織発達程度と比較しながら調べてきた。本年度の共同研究においては、低エネルギーイオン照射したモリブデン(Mo)ミラー材の光反射率変化の結晶方位依存性の評価を行った。

#### 2. 実験方法

試料は(株)ニラコ社製の粉末焼結材、および単結晶材（岡山理科大学理学応用物理学科平岡教授より御試供）の Mo 試料を用いた。単結晶材については、SEM-EBSD により結晶方位を評価した後に、試料表面の法線方向がそれぞれ $\langle 001 \rangle$ 、 $\langle 101 \rangle$ 、 $\langle 111 \rangle$ と一致するように試料を切り出して実験に用いた。室温で 3 keV のヘリウムイオン照射を行い、照射後の表面組織変化と結晶方位の関係を探るために SEM-EBSD を用いた表面観察、結晶方位解析を行った。また、照射後の光反射率変化を分光エリプソメトリーにより測定した。

#### 3. 結果および考察

鏡面研磨仕上げした多結晶 Mo 試料に室温で 3keV-He<sup>+</sup>を 10<sup>22</sup> He/m<sup>2</sup> 照射した結果、試料表面には、結晶粒ごとに異なった表面形態が観察された。照射前の EBSD による結晶評価との対応から、表面組織には明らかな方位依存性がある事が明らかになった。図 1 は照射後の表面損傷組織と結晶方位の関係を示している。試料表面の法線方向が $\langle 001 \rangle$ に近い結晶粒ではクレーター状の窪みを含む激しい凹凸が観察され、 $\langle 101 \rangle$ 、 $\langle 111 \rangle$ の結晶粒では、比較的滑らかな表面が維持されていた。ただし、高倍率の SEM 観察結果では $\langle 101 \rangle$ や $\langle 111 \rangle$ の結晶粒においても、ヘリウムバブルに

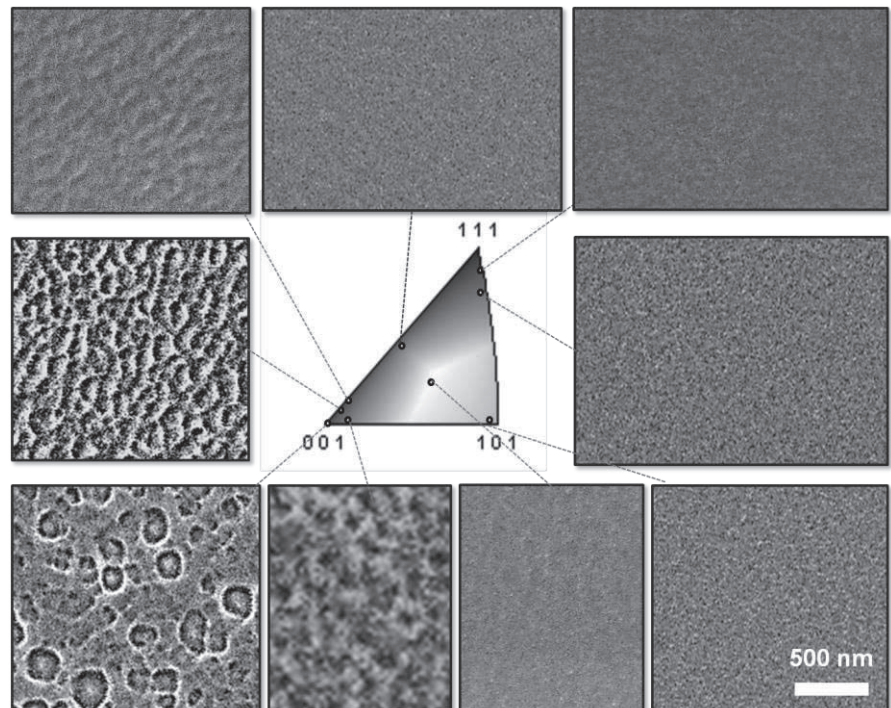


図 1 室温で 3keV-He<sup>+</sup>を 10<sup>22</sup> He/m<sup>2</sup> 照射した多結晶 Mo 試料の表面組織の結晶方位依存性 (SEM 像)。観察した各々の結晶粒表面の法線方向を逆極点図上に示している。

起因すると考えられる緻密なホールを伴う微細な凹凸が観察されている。さらに、表面スパッタリングによる損耗は、激しい凹凸を示す<001>の結晶粒で小さく、スパッタ率の高い結晶粒において滑らかな表面が維持されることが明らかになった。同様な観察結果は、(001), (101), (111) を試料表面にもつ単結晶試料においても得られた。

一方、光学特性評価においては、表面組織観察から予想される結果とは逆の結晶方位の依存性がみられた。図 2 は、それぞれの単結晶試料に  $3\text{keV-He}^+$ ,  $10^{22}\text{He/m}^2$  照射した後の光反射率を示している。光反射率は、照射前の値で規格化している。(100)の試料と比較して、(110)及び(111)試料において大きな反射率劣化が観察される。この結果は、反射率が表面形態だけでなく表面直下の損傷組織にも強く依存するためだと考えられる。今後、照射済み単結晶試料の FIB を用いた断面微細組織観察を行い、内部の損傷組織との関連を評価する予定である。

本研究結果は、イオン照射下で金属ミラーを用いる場合、結晶方位制御がミラー材の高寿命化につながる可能性を示唆するものである。照射試料の電気抵抗率変化の測定にも着手しており、来年度は、照射による構造の乱れが、電気伝導特性に与える影響もあわせて評価していく予定である。

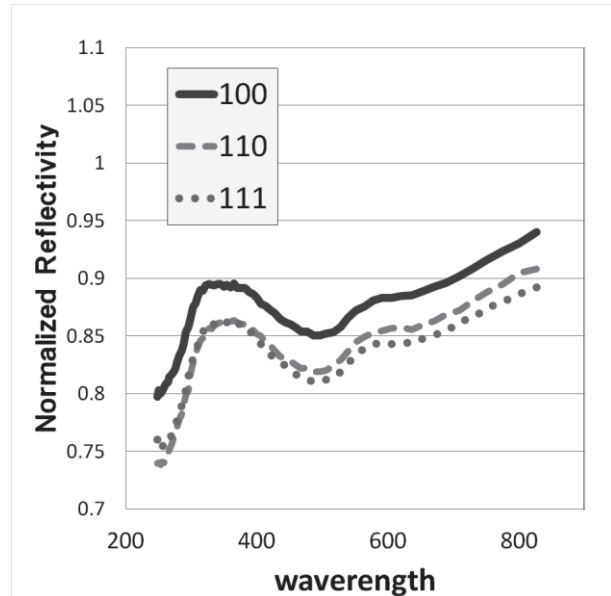


図 2 イオン照射( $3\text{keV-He}^+$ ,  $10^{22}\text{He/m}^2$ , R.T.)した単結晶 Mo 試料の相対光反射率。

## ● 学術論文

1. Y. Sakoi, M. Miyamoto, K. Ono, M. Sakamoto “Helium irradiation effects on deuterium retention in tungsten”, Journal of Nuclear Materials, in Press

## ● 学会発表等

1. 山本将寛, 宮本光貴, 吉田直亮, 時谷政行, 相良明男, 波多野雄治「LHD 実機プラズマに曝した対向材料の光学特性評価」, プラズマ・核融合学会第 29 回年会, 福岡, 2012 年 11 月
2. 高岡宏光, 宮本光貴, 森戸茂一, 小野興太郎「ヘリウムイオン照射した Mo ミラー材料の表面損傷及び反射率変化の結晶方位依存」, プラズマ・核融合学会第 29 回年会, 福岡, 2012 年 11 月

## ● 研究組織

研究代表者： 宮本光貴 (島根大学大学院総合理工学研究科助教)

所内世話人： 渡辺英雄 (九州大学応用力学研究所准教授)

研究協力者： 高岡宏光, 山本将寛 (島根大学大学院総合理工学研究科博士前期課程)

## 第一原理計算によるタングステン中のガス元素吸蔵および拡散の研究

研究代表者 日本原子力研究開発機構 山口正剛

## 【研究の背景】

国際熱核融合実験炉(ITER)では激しいプラズマ照射をダイバーターが受ける設計になっている。また、燃料であるトリチウムは放射同位体であるために炉材料への残留が問題になっている。そこで、特にダイバーターは水素溶解度が低く、耐摩耗性、耐熱特性、に優れたタングステン系の材料で被覆されることが計画されている。そこでタングステンと水素との相互作用の研究が盛んに行われるようになった。本研究ではBCC金属空孔に捕獲される水素（水素同位体）のシミュレーション研究を行ってきた。その結果、BCC構造の遷移金属(V、Nb、Ta、Cr、Mo、W、Fe)は7種類あるものの、タングステンとモリブデンは水素との相互作用という点では大きく他の金属と異なることが明らかになった。通常はBCC金属の空孔には水素は6個まで捕獲されると言われてきたが、タングステンとモリブデンは12個まで捕獲する。さらに、水素の安定な位置は空孔中のOサイトではなく、捕獲数が多くなるほどTサイト近傍にまで移動することが分ってきた。今年度は特にタングステン結晶およびタングステン空孔内部の水素の移動拡散について計算した。特に活性化エネルギーを計算した。それをもとに、熱平衡状態を仮定してタングステン中の空孔濃度を計算した。水素雰囲気下では空孔水素複合体が生成されるが、複合体の方が生成エネルギーが著しく低いために空孔の超多量生成が起こると言われている。そこで本研究では有限温度における水素濃度と空孔濃度の関係を計算した。

## 【第一原理計算】

本研究では第一原理計算の汎用コードであるVienna ab-initio simulation package (VASP)を使った。ポテンシャルは一般化勾配近似タイプ(GGA)のもの、K点の密度は $5 \times 5 \times 5$ 、原子緩和は各原子に働く力が  $0.003 \text{ eV/\AA}$  以下になるまで緩和を繰り返した。スーパーセルはBCC格子で原子54個のものを使った。また、水素の移動に対する活性化エネルギーを計算するために遷移経路に沿って10個のレプリカを置いた。そしてnudged elastic band法を使って計算した。この方法は遷移経路上の最高点(鞍点)を計算する方法として優秀である。

## 【タングステン中の水素の移動エネルギー】

図1(a)のようにタングステンのようなBCC結晶中の水素はTサイトが安定である。また、図1(b)のように隣のTサイトに移るために必要なエネルギーは $0.197 \text{ eV}$ である。多くの実験および計算でもこの程度の値が得られている。一方、図2のように空孔中の水素はOサイトが安定である。空孔に捕獲された水素が隣のOサイトに移動する際には $0.208 \text{ eV}$ 必要である。偶然であるが、両方の活性化エネルギーはほぼ等しい。さらに、図3には水素が3個捕獲された場合の例が示してある。この場合は1つの基底状態から別の基底状態に移るために必要なエネルギーは $0.213 \text{ eV}$ だった。空孔中の水素が5個以下の構造について同様の計算をした。その結果、水素が結晶内を拡散する、または空孔内で構造を変化させるための活性化エネルギーはどれも $0.19$ から $0.21 \text{ eV}$ 程度である。この値はタングステン中の水素の移動を考える場合の特徴的なエネルギーになる。

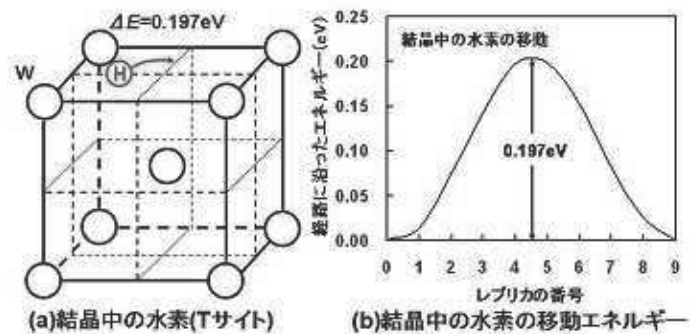


図1:結晶中の水素の安定位置と移動エネルギー

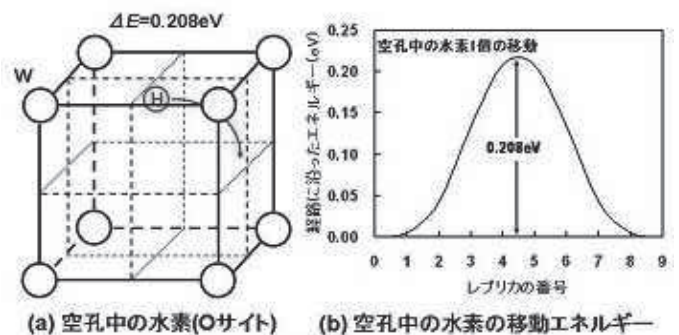


図2:空孔中の水素1個の安定位置と移動エネルギー

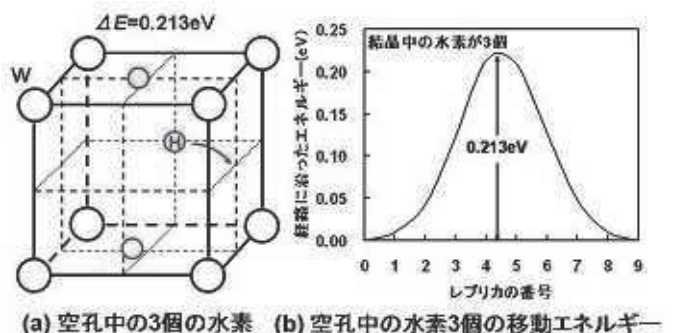


図3:空孔中の水素3個の安定位置と移動エネルギー

ところが、空孔に6個以上の水素が捕獲された場合は事情がかなり違ってくる。たとえば、図4は水素が6個捕獲された状態である。構造(A)と構造(C)はともに基底状態で、水素はOサイトから格子定数の15%程度ずれた位置が安定である。構造(A)から構造(C)に変化する過程で構造(B)を経由すると図5のように活性化エネルギーは通常0.2eVと比べて極めて小さな0.035eVになる。

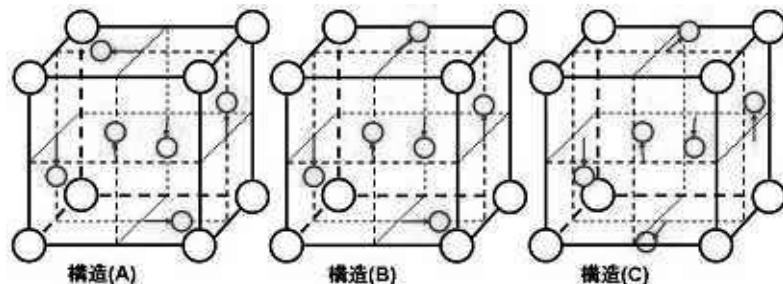


図4:空孔内の水素6個の基底状態(A)と(C)、および準安定状態(B)

基底状態の構造(A)と(C)の間は室温程度(300K)の活性化エネルギーでお互いに行き来できる。このような場合は1つの状態として数える方が合理的であろうと考えた。タングステン空孔には水素は最高で12個まで捕獲されるために、基底状態が何重にも重複しているように見える場合がある。しかし、本研究では0.05eVに一応の区切りをつけ、お互いに簡単に遷移できる状態は1つの状態とみなすことにした。

**【熱平衡状態での空孔濃度計算】**

熱平衡状態での空孔(空孔水素複合体)濃度を計算する。必要な変数は以下のように定義する。また、空孔の生成エネルギーなど必要な数値はRef[1-2]を参照のこと。分配関数は次のようになる。

$$Z = N_0 \times N C_N \cdot 6N_0 - 18N C_{NH-M} \frac{N!}{n_0! n_1! \dots} \omega_0^{n_0} \omega_1^{n_1} \dots \exp \left( - \frac{\sum_{m=0} E_m}{k_B T} \right)$$

$N_0$ : 全タングステン原子数

$N_H$ : 全水素数

$n_m$ :  $m$ 個の水素を捕獲した空孔数

$N$ : 全空孔数  $N = \sum_{m=0} n_m$

$M$ : 空孔に捕獲された全水素数  $M = \sum_{m=0} m n_m$

$\omega_m$ : 空孔中の水素 $m$ 個の状態多重度

$E_m$ : 空孔水素複合体の生成エネルギー

分配関数より自由エネルギーや空孔濃度が計算できる。

$$F = -k_B T \ln Z \quad \partial F / \partial n_m = 0$$

**【空孔濃度の温度および水素濃度依存性】**

図6が有限温度での空孔濃度である。水素濃度が低い場合は、温度が高いほど空孔濃度は大きくなる。これは通常の熱平衡空孔濃度と一致する。一方で、水素濃度が高いほど空孔濃度も上昇する。これは水素により空孔生成エネルギーが著しく低下することが原因である。いわゆる空孔の超多量生成を反映している。タングステン空孔に水素は12個まで捕獲される可能性がある。しかしながら、熱平衡を仮定した場合は6個の水素を捕獲した空孔水素複合体の数が圧倒的に多い。それは $E_{12} = -4.245\text{eV}$ なのに対して $E_6 = -2.742\text{eV}$ であるから、1つの空孔に12個の水素が集まるよりも、2つの空孔に水素を6個ずつ振り分けた方が自由エネルギーを低くできるからと考えられる。

**【まとめ】**

タングステン結晶の拡散に対する活性化エネルギーは0.197eV、空孔中の水素の構造変化に対しても同じ程度(0.19から0.21eV)であった。熱平衡状態を仮定して空孔(空孔水素複合体)濃度を計算したところ、水素濃度が高い場合は空孔の超多量生成が起こる。

**参考文献**

[1] Reports Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University **143** (2012) 29.  
 [2] Phys. Rev. B 85 (2012) 094102.

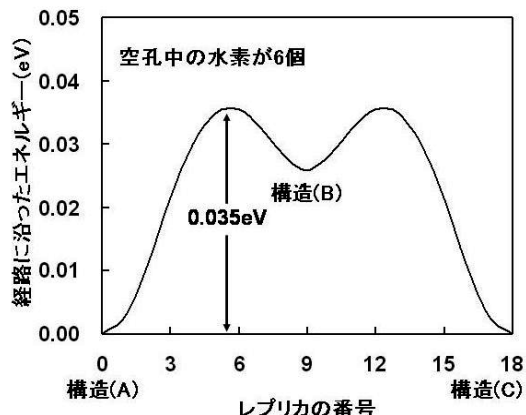


図5:空孔中の水素6個の場合の活性化エネルギー

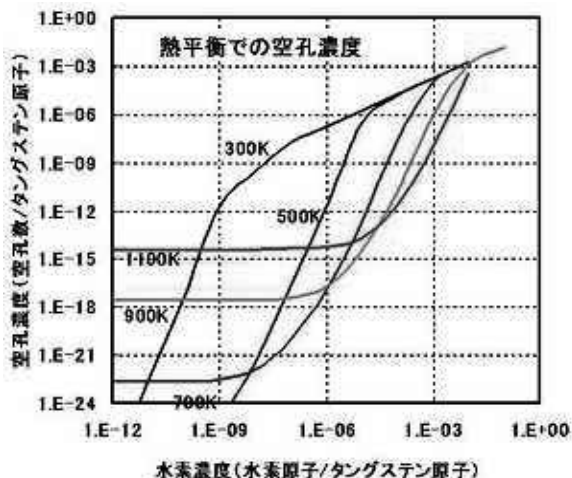


図6:有限温度での水素と空孔濃度の関係(熱平衡)

## 巨視的運動論的 MHD 現象解析用の トロイダル版ジャイロ運動論的粒子コードの開発

山口大学大学院理工学研究科 内藤裕志

### 目的

現在、トカマクプラズマ中の巨視的 MHD 現象では、従来の理想 MHD や抵抗性 MHD モデルでは説明できない場合が数多く観測されている。このため拡張 MHD (または運動論的 MHD) モデルの重要性が増している。ただし、MHD 現象を解明するために流体系のモデルを用いる場合には、流体モデルの近似の妥当性、高次のモーメントを低次のモーメントで近似するモデルの妥当性 (いわゆるクロージャーの問題) の問題があり、モデルの validation と verification をきちんとする必要がある。このため、より第一原理に近いモデルであるジャイロ運動論をもとにしたジャイロ運動論的粒子コードを開発し、拡張 MHD モデルに基づく流体コードとの詳細な比較を行うことが重要である。

報告者等は、巨視的かつ運動論的 MHD 現象の解明を目指してジャイロ運動論的粒子コード Gpic-MHD を開発してきた。現在の版は零次のトロイダル効果に対応した円柱版のコードである。本研究では、Gpic-MHD のトロイダル版の作成を目的としている。長期的目標としては、ITER 等の高温・高密度の核燃焼を含むトカマクプラズマの運動論的 MHD 現象の解明、輸送現象と MHD 現象の競合する物理の解明がある。

### シミュレーションモデル

円柱版 Gpic-MHD の概要は以下のとおりである。デルタエフ法を用いたジャイロ運動論的 PIC コード。半径方向は差分法を用い、非一様メッシュに対応している。ポロイダル方向とトロイダル方向は高速フーリエ変換を用いてモード展開している。擬スペクトル法を用いる。フーリエ空間で不必要なモードを消去することにより、時間ステップ幅を大きくとることができる。スレッド並列 (自動並列コンパイラまたは OpenMP を使用) とプロセス並列 (MPI 使用) を併用したハイブリッド並列コードになっている。プロセス並列は、領域分割と粒子分割 (場の量のレプリカを用いる) を併用する。

### 研究成果の概要

#### A. 現在までの研究成果

標準的な Gpic-MHD により、鋸歯状振動の崩壊過程に関連する運動論的内部キンクモードの線形・非線形のシミュレーションが可能であることを示した。Gpic-MHD は「クロージャー」の問題がないため、流体コードの結果の正当性・健全性をチェックするためにも有用である。

3次元版 3D-Gpic-MHD は、場の量の計算が増大するため、並列化のため領域分割を利用している。トロイダル方向のみの1次元領域分割の場合、トロイダル方向と半径方向の2次元領域分割の場合 に対して良好な並列化スケーリングを得た。

標準的なジャイロ運動論的 PIC コードは、大規模・高ベータのプラズマを取り扱う場合、電流密度から磁場を求める際に大きな誤差が生じることが知られている（「キャンセレーション」の問題）。この問題の解決法として `split-weight-scheme` があるが、我々は場の量の計算に渦方程式と磁力線方向の一般化オームの法則を用いる先進的アルゴリズムを提唱し、この方法による新しい `2D-Gpic-MHD` を作成した。また、新しい `2D-Gpic-MHD` を用いて大規模・高ベータの領域でも精度良く運動論的内部キンクモードがシミュレーション可能であることを実証した。

先進的アルゴリズムに対応するトロイダル版 `Gpic-MHD` コードの定式化を完成した。これらの成果を基盤にしてトロイダル版のコードを作成する研究フェイズに入った。

## B. 本年度の研究成果

円柱版の `Gpic-MHD` では、非線形計算を行う際、コードが発散する事例がある。これは、磁気軸近傍での粒子や場の量の取り扱い、半径方向非等間隔メッシュの半径方向密度分布の取り方、ハイパーレジスティビティの与え方等を適切に選択することにより改善される。これらの方法を併用しながらより長時間の非線形計算が可能なノウハウを取得した。これらの経験はトロイダル版 `Gpic-MHD` での非線形計算に適用可能である。

SR16000 のアップグレードに伴い、円柱版 3 次元 `Gpic-MHD` の並列化性能を再検証した。アップグレード前と比較して 1.5 倍程度の高速化が達成されていることを確認した。合わせて、スレッド数やコピー数を変化させた場合の高速化率の論理コア数依存性のスケーリングの検証等を行い、更なる並列化の最適化のための基礎データを集積した。また並列コンピュータとして `HELIOS` を用いた場合のスケーリングとの比較を行った。なお `HELIOS` では 3 2 7 6 8 コアまでの並列化性能を検証した。

本研究の主目的のトロイダル版の作成については、現在パーツ毎の作成を目指して進行中である。今後は、統合されたコードの完成を目指す予定である。

## 成果報告

### 口頭発表

[1] 内藤裕志、「巨視的運動論的 MHD 現象解析用トロイダル版ジャイロ運動論的粒子コードの開発」、RIAM フォーラム 2012、2012 年 6 月 5 日、C キューブ筑紫ホール（福岡県春日市）

[2] H. Naitou, K. Itoh, M. Yagi, S. Tokuda, “Formulation of gyrokinetic MHD model for tokamak simulation”, 7<sup>th</sup> Japan-Korea Workshop on Theory and Simulation of Magnetic Fusion Plasmas, 26 July 2012, Nami Island, Chuncheon, Gangwondo, Korea.

[3] 内藤裕志、徳田伸二、矢木雅敏、中島徳嘉、「`Gpic-MHD` コードの開発と並列化の現状」、プラズマシミュレータシンポジウム 2012、2012 年 9 月 11 日、核融合科学研究所（岐阜県土岐市）

[4] 松田大、西山達也、田内康、内藤裕志、「`Gpic-MHD` コードのハイブリッド並列による高速化」、平成 24 年度（第 36 回）電気・情報関連学会中国支部連合大会、2012 年 10 月 20 日、島根大学（島根県松江市）

## 低エネルギーヘリウムイオン照射された絶縁体における光学特性

琉球大学教育学部 岩切宏友, 仲松一星, 古堅辰明  
九州大学応用力学研究所 渡邊英雄, 吉田直亮  
京都大学エネルギー理工学研究所 森下和功

## 【研究の目的】

イオンビーム照射法とは、真空中で目的とする粒子をイオン化し、数 keV～数 MeV のエネルギーに加速して固体や薄膜の表層(深さ数 nm～数 μm)に打ち込み、その物性を制御する技術である。この手法では、溶解度に関わらず非熱平衡状態で原子を注入することができるため、自然界には存在しない新しい構造や特性をもった物質の形成が可能である。

固体物質中の光学的特性は、物質中の電子状態によって決まっている。イオンビームを固体物質中に照射すると、物質結晶中に格子欠陥(点欠陥)が形成されるために、物質中の電子状態が大きく変化するので、固体物質中で新たなバンド構造を形成する。その結果、イオンビーム照射された固体物質の光学的特性が変化し、無色透明だった物質が色味を帯びることが知られている。

本研究では結晶性 SiO<sub>2</sub> を主な対象とした。石英(SiO<sub>2</sub>)は大きく結晶性石英と合成石英に分けられるが、合成石英では照射による光吸収率の変化がほとんど見られない。これは表面領域がアモルファス化している事が原因であると考えられる。そこで、本研究では、最表面まで結晶化した SiO<sub>2</sub> (東京電波製)を使用し、可視光の透過率・反射率の測定を行うことで、照射によって形成された格子欠陥が与える光学特性変化を調べた。

## 【研究方法】

結晶性 SiO<sub>2</sub> に様々な条件下でイオンビームを照射し、紫外可視光領域における光透過及び光反射スペクトルを測定した。試料のバンドギャップは 9.0keV である。照射実験は軽イオンビーム照射装置(琉球大学)及び制御イオンビーム照射装置(九州大学応用力学研究所)を用いた。照射イオン種は He<sup>+</sup>、照射エネルギーは 7.0keV、照射温度は RT～873K、照射量は  $1 \times 10^{20} \sim 1 \times 10^{22} \text{He}^+/\text{m}^2$  である。また光透過率測定には V-650 型紫外可視光分光光度計(琉球大学)を、光反射率測定には V-670 型紫外可視光分光光度計(九州大学応用力学研究所)を用いた。

## 【研究結果】

まず、室温下における光透過率の変化を調べるために、 $1 \times 10^{20} \text{He}^+/\text{m}^2$  および  $3 \times 10^{21} \text{He}^+/\text{m}^2$  の照射を行った。 $1 \times 10^{20} \text{He}^+/\text{m}^2$  では 200～360 nm の波長領域において未照射領域より透過率が低下し、360 nm～800 nm では逆に透過率は上昇した。また、照射量  $3 \times 10^{21} \text{He}^+/\text{m}^2$  では測定した全波長領域において透過率が低下しており、波長 360 nm 付近において未照射領域と比べ最大 5.5 ポイントの低下が見られた。さらに、波長 240 nm 以下の短波長側では急激な透過率の減少が確認された。続いて、時効による光学特性変化についての知見を得るため、室温および 473 K で照射された試料を -20℃ で冷凍保存した場合と常温保存した場合に分けて光透過率を測定した。照射量は

全て  $3 \times 10^{21} \text{He}^+/\text{m}^2$  である。室温照射の場合、冷凍保存された試料は全波長領域で透過率が減少し、特に低波長側での減少幅が大きかった。また、わずかながら波長 380 nm 付近に吸収ピークも見られた。その後常温で保存された試料の光透過率は全波長領域において未照射領域を上回った。473 K の場合、冷凍保存した試料の光透過率は測定した全波長領域で減少し、特に短波長領域でより低下していた。また、波長 350 nm では 4.7 ポイントのピーク低下が見られた。一方、常温保存の場合は驚くべきことに高波長領域では未照射領域より光透過率は上昇し、短波長領域では光透過率は減少していた。さらに、波長 270 nm より短い波長に関しては光透過率の減少が顕著で、波長 200 nm では冷凍保存とほぼ同じ光透過率となった。また、照射によって生じた着色も徐々に消失していった。次に照射温度依存性における光透過率を測定した。照射量は  $3 \times 10^{21} \text{He}^+/\text{m}^2$  に固定し、照射温度はそれぞれ 473 K, 673 K, 773 K である。473 K と 673 K は全波長領域において未照射領域よりも透過率が低下しているが、この 2 つを比較すると波長 370 nm より短波長側では 673 K が、一方で高波長側では 473 K が透過率は低かった。また、照射温度が 773 K になると他の 2 つと比べ透過率の顕著な低下は見られなかったが、波長 510 nm より短波長側では未照射領域より透過率は低下し、高波長側ではそれよりわずかに上昇した。続いて、照射量依存性における光透過率の変化を検証した。照射温度は 873 K であり、照射量は  $3 \times 10^{20}, 3 \times 10^{21}, 1 \times 10^{22} \text{He}^+/\text{m}^2$  である。照射量が大きくなるほど光透過率の減少が進行していることが確認できた。 $1 \times 10^{22} \text{He}^+/\text{m}^2$  では波長 360 nm 付近で 90.0 % から 85.3 % と約 4.7 ポイントの光透過率の低下が起こり、わずかに吸収ピークが見られた。 $3 \times 10^{20} \text{He}^+/\text{m}^2$  では波長 430 nm 付近を境にやはり低波長側では透過率が未照射領域よりも減少し、高波長側ではそれより上昇した。また、波長 200 nm 付近ではいずれも急激な透過率の減少を示した。

本研究では光反射率を測定したが、試料の表面反射のみを測定するために裏面をダイヤシートで研磨する作業を行った。その後、照射前の試料の光反射率における研磨前と研磨後の差異を測定した。研磨を行うことにより、3 ポイント程度（研磨前の試料と比較すると 30 % 程度）反射率が減少した。また波長 220 nm より短波長側では 4 ~ 5 ポイント程度の反射率の低下が確認された。続いて照射量  $3 \times 10^{21} \text{He}^+/\text{m}^2$  で 473 K に加熱照射後の光反射率を測定した。測定の際には試料の裏面を研磨してある。波長 200 nm 以下の極低波長側を除いて、反射率が減少した波長とほとんど変わらない波長が出現した。前者は反射時における光吸収が生じていると考えられる。また後者は波長 350 nm 付近に確認できた。続いて、照射量  $1 \times 10^{22} \text{He}^+/\text{m}^2$  で 873 K に加熱照射された光反射率を測定した結果、こちらも 473 K の場合と同様の結果が得られた。

(成果発表)

- 仲松一星：SiO<sub>2</sub> 中におけるヘリウム原子の挙動，平成 24 年度琉球大学教育学部自然環境科学教育コース 課題研究発表会（2013 年 2 月）

## 24 FP-12

### 環状プラズマ実験装置第一壁の水素透過挙動に関する研究

核融合科学研究所 廣岡慶彦

課題番号：24FP-4

研究課題：環状プラズマ実験装置第一壁の水素透過挙動に関する研究

研究期間：H24年4月1日～H25年3月31日

所内世話人：関子秀樹

協力者：5名（芦川直子、周海山[Zhou Haishan]、関子秀樹、井上雄貴）

配分額：校費（4万円）、旅費（5万円）

#### 目的：

高温・高密度水素プラズマの定常放電を行う QUEST のような環状装置では、水素の動的保持量（ダイナミック・インベントリー）が閉じ込め性能と施設安全性に関連して重要なパラメーターとなる。ところが、環状装置の真空を保持するための壁（一般に『第一壁』と呼ばれる）は、周辺水素プラズマに直接曝されるためその運転温度によっては、水素を装置外部に透過させてしまう可能性がある。このような第一壁の水素透過挙動は、特に、定常プラズマ運転時に第一壁が高温状態になる場合、燃料供給量の制御及び実験施設の安全上重要な問題となる。本研究では、このような観点から QUEST 装置を用いて鉄系合金（SUS304・F82H等）の水素透過挙動を測定し基礎的知見を得ることを目的とするものである。

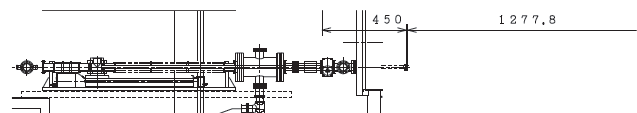
#### 実施方法：

QUEST の周辺部分に上記材料を用いて作成した透過試料を組み込んだ透過実験セットアップを設置し透過膜試料の下流側（プラズマ側を上流として）に質量分析計（QMS）を用いて気体水素の分圧測定から水素の透過量を算定する。定常プラズマとしては、放電洗浄用の低温・低密度の ECH 水素プラズマと高温・高密度の閉じ込め実験プラズマとがあるので、これら2種類のプラズマに曝した場合の透過挙動を測定・解析する。なお、水素透過挙動のモデリングに関しては、DIFFUSE-コード[参考文献-1]を用いる予定である。

#### 実験結果：

##### 1) 可動透過プローブの試作

可動透過プローブを試作し、これを水平ポートに設置した。将来の核融合炉で問題となる SUS 系、F82H 壁に及ぼすトリチウムインベントリーの評価を目的として SUS(厚さ 0.2mm, 直径 16φ) および H82H(厚さ 0.2mm, 直径 16φ) フランジをプローブ先端部に取り付けこれを透過する水素ガスを計測するシステムを構築した。下流側には QMS と D2 標準リークがあり H<sub>2</sub> ガスの検出と校正が行える。膜の加熱は配管内にもうけたランプで行い通常 250 度で計測した。このシステムは図



プローブ駆動装置

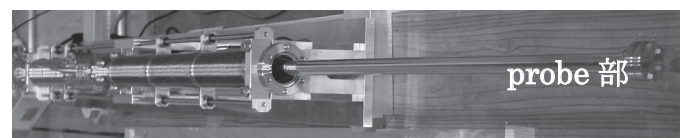


図1 (上) 水平図 (QUEST 中心は右側)

(下) 可動透過プローブ (先端部の ICF34 フランジが透

1に示すように本体ポートに挿入可能であり、壁から約130mmまで挿入可能である。長時間運転では膜温度は周辺プラズマ曝露により若干上昇する傾向がある。

## 2) 定常プラズマにおけるH原子透過計測

鉄系合金 (SUS304, F82H) の定常水素プラズマ照射による透過挙動を比較するために、核融合科学研究所に設置された直線型定常プラズマ装置 V I H E C L E - 1 [2] を用いて照射実験を行った。その結果を図2に示す。厚さは同じく1mmであり、約220°Cで透過挙動を観測したところ、F82Hで  $3 \times 10^{17} \text{H}_2/\text{m}^2\text{s}$ 、SUS304で  $2 \times 10^{16} \text{H}_2/\text{m}^2\text{s}$  の定常透過束を実測した。一般に、定常透過束の解析には拡散-拡散 (DD)、拡散-再結合 (DR)、および再結合 (RR) 律速モデル等が適用でき、100Vでの入射飛程が非常に浅い点 (~10nm) を考慮すると、可能性としてRDおよびRRタイプが残る。前者は拡散係数に比例し厚さに反比例する。今回の透過束実験データが膜厚に依存することからRDモデルで説明できることを明らかにした[3]。SUS304を用いてQUESTのECRDCプラズマでの透過を調べた。QUESTの真空容器はSUS316L/304を用いており、水素の吸蔵特性の把握のためにはこの知見は有用である。図3に示すようにECRプラズマの放電時間は15分であるが、短パルスでは応答しないが、定常プラズマでは十分な感度で透過することがわかった。定常での透過量は厚さを下げれば増加が期待できる。図2のV I H E C L E - 1でのSUS304の結果は定常までにおおよそ10000秒を要しており、QUESTでの壁への入射束を模擬した実験結果は矛盾しない。放電洗浄時にトロイダル磁場を変化させ共鳴位置を変えているが、図3(下)にはその変化をとらえており、

この程度の厚さにおいてもプラズマ・壁相互作用の状況を把握可能なことがわかった。今後F82Hに先端を変えることにより、フェライト系金属での透過物性値、透過特性が得られると思われる。

## 参考文献

- [1] M. I. Baskes, "DIFFUSE83" Sandia Rep. SAND83-8231. [2] Y. Hirooka et al., J. Nucl. Mater. **337-339**(2005)585-589. [3] H. Zhou et al., "Hydrogen plasma-driven permeation through a ferritic alloy F82H", Paper presented at the Joint conf. of 9<sup>th</sup> Int. Conf. Open Magnetic Systems for Plasma Confinement (OS2012) and 3<sup>rd</sup> Int. Wkp on Plasma-Material Interaction Facilities for Fusion (PMIF2012), Tsukuba, Aug. 27<sup>th</sup> -31<sup>st</sup>, 2012.

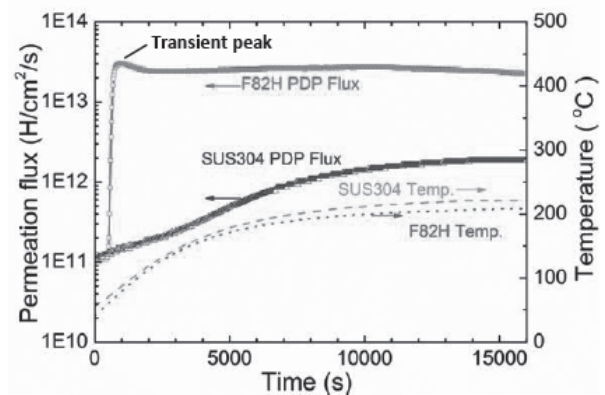


図2 厚さ1mmのSUS304およびF82Hの透過曲線(2.45GHzで生成した連続プラズマを直接照射)温度はプラズマ照射によって昇温している。同じ厚さではF82Hは1-2桁以上透過束が大きい。

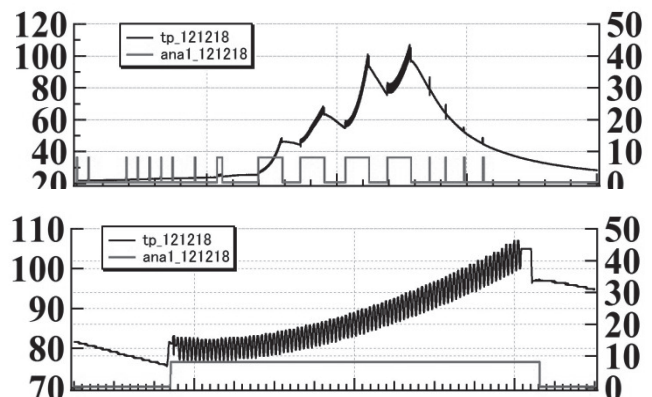


図3 (上) ECRDCプラズマにおけるSUS透過曲線。透過曲線の単位は  $10^{-6} \text{Pa}$  時間は全体で2000秒、図中右軸は赤で示した放電パルス幅に対応(下)は1shotのみの拡大図 透過曲線の変動はトロイダル磁場の変化によるPWI領域の変化に対応

# 24 FP-13

## タングステン被覆した低放射化材料の接合界面における微細組織と強度特性の相関

京都大学エネルギー理工学研究所 木村 晃彦

### 1. 目的

本研究では、低放射化構造材料のW被覆の製作および性能評価試験を実施し、最適な被覆プロセス・条件の探索を行うと共に、被覆・接合のメカニズムを解明し、より優れたW被覆作製のための材料科学的基礎知見を得る事を目的とする。

### 2. 研究成果の概要

ODS 鋼、V 合金および低放射化フェライト鋼 (F82H、JLF-1) に対する W 被覆に関しては、真空プラズマスプレー (VPS) 法および液相拡散接合法 (TLPB) が適していることを確認し、それらの技術開発に向けた研究を実施した。東北大学において開発された高靱性 W-TiC と京都大学において開発された高耐熱性フェライト系 ODS 鋼との接合技術開発研究を進めた。

#### 真空プラズマスプレー (VPS) 法

高密度で高い熱伝導率を示す VPS-W を製作するための VPS 条件の検討を行った。検討した VPS 条件は、原料粉末の粒度、噴射ノズル・基板間距離、走査速度および基板厚さである。各種 VPS 処理後の特性評価および金属組織観察の結果、優れた特性を発現させるためには VPS-W が空隙 (ポア) の少ない柱状晶組織であり、噴出された W 粉末が十分に熔融して連続的な粒成長を通じて凝固することが高性能の W アーマー材を製作するための必要条件となることが判明した。VPS-W の断面組織において柱状晶の占める面積率が增大すると、40%までは密度および熱拡散率が上昇するが、それ以上では一定の値であることが報告されている。

また、VPS-W の熱伝導率は W バルク材に比べ、かなり低い値を示しているが、初年度 (青) に比べ、今年度作製した VPS-W (赤) では顕著な増大が認められる。電子線後方散乱回折 (EBSD) 法を用いて、VPS-W の結晶粒組織を観察すると、熱伝導率の大きな VPS-W においては、柱状晶が成長し、空隙 (ポア) の小さいことが判明した。VPS-W の性状は、柱状晶の面積率および空隙 (ポア) によって、定性的に評価が可能であることが判った。作製した VPS-W (F82H: 板厚 5mm) の熱負荷実験を実施した結果、電子ビーム加熱による定常熱負荷実験 (熱負荷: 7.5 MW/m<sup>2</sup>, 立ち上げ: 30s, 定常: 180s, 照射時間: 3min) では、VPS-W 表面および基板である F82H 鋼の温度がそれぞれ 700℃および 600℃に

表 1: 液相拡散接合条件および材料

	組成	接合温度	接合圧力	接合時間	真空度
W	Pure tungsten (99.95%) 30 × 30 × 2t [mm]	1240℃	10MPa	1h	4 × 10 <sup>-3</sup> Pa
ODS鋼	Fe-15Cr-2W-0.2Ti-0.35Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 30 × 30 × 5t [mm]				
インサート材	Fe-3B-5Si Amorphous 30 × 30 × 0.025t [mm]				

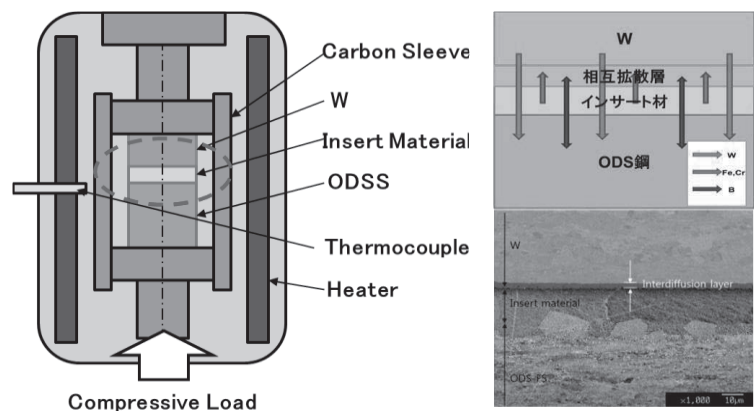


図 1: W/ODSS 液相拡散接合 (TLPB) 後の接合界面近傍組織及び構成元素の流れ

上昇したが、試験後の VPS-W 表面には全く変化が認められず、熱負荷に伴う表面損傷の形成を確認することができなかった。一方、熱疲労実験（熱負荷：7.5 MW/m<sup>2</sup>、Beam on：60s、Beam off：140s、照射回数：30cycles）の場合は、微小な亀裂が形成されたものの、大きな表面損傷は認められず、比較的良好な耐熱負荷特性を示した。

## 2) 液相・固相（拡散）接合法

W と ODS 鋼とでは、材料特性が極めて異なるため、困難が予想されていた板材どうしの接合技術開発として、鉄基アモルファス合金や Ti 合金をインサート材として用いるろう付け法（TLPB）の改良を進めた。「接合界面強度」を破壊力学的に評価するための試験法として、せん断強度試験法を開発し、異なるサイズの接合試験片を用いてせん断強度を評価した。接合部の組織観察および化学組成を調べ、接合処理による接合部構成元素の拡散に関する情報を得た。

熱膨張係数の異なる異種金属接合には、TLPB が優れていることが理論的、実験的に示されていることから、インサート材に融点降下元素からなる鉄系のアモルファス合金を採用し、純 W とフェライト系の ODS 鋼の液相拡散接合を表 1 に示す条件下で実施した。EPMA による接合後の接合界面近傍における元素分析結果は、接合界面に W、Cr および Fe が高濃度に分布する相互拡散相が存在すること、W が相互拡散層及びインサート材を超えて ODS 鋼側に拡散していることおよびインサート材中の B が相互拡散層及び ODS 鋼に拡散していることが明らかとなった。B の拡散は、接合時におけるインサート材およびインサート材に接する相互拡散層及び ODS 鋼の熔融に伴うものであり、B 化合物の形成が懸念される。また、W がインサート材を透過して ODS 鋼に拡散することが明らかになった。W は鉄中では脆化に寄与するとされている Fe<sub>2</sub>W-Laves 相を形成するため、この場合も脆化が懸念される。そこで、せん断強度評価試験を実施した。

これまで、せん断強度試験はねじり試験法を採用して実施してきたが、ねじり試験法では、せん断力が試料断面の中心から表面への半径方向に線形的に変化するため、せん断力を過大評価する可能性がある。そこで、本研究ではせん断試験治具を用いて、室温においてせん断試験を実施した。図 2 に応力ひずみ曲線を示しており、W と示したデータは、W 単体のせん断強度試験データである。試験片サイズ効果を調べるため、接合界面面積が 1x1 (mm)、1.5x1.5 (mm)、3.3x3.3 (mm)の三種類の試験片に対して試験を実施した結果、試験片の小型化に伴い、応力ひずみ曲線の傾きが小さくなり、データのばらつきが増大することが判った。図 3 は、接合界面が 3.3x3.3 (mm)の場合であり、応力ひずみ曲線の傾きが各試験片に対してほぼ同一であり、試験片と治具の間のすべりに伴う曲げモード発生の度合いも少ないと言える。この結果によると、接合界面強度は W に比べ、低い傾向を示しているが、同等の場合も観察されており、現状の W 材料のせん断強度に近い強度を持つ接合界面が得られたと言える。

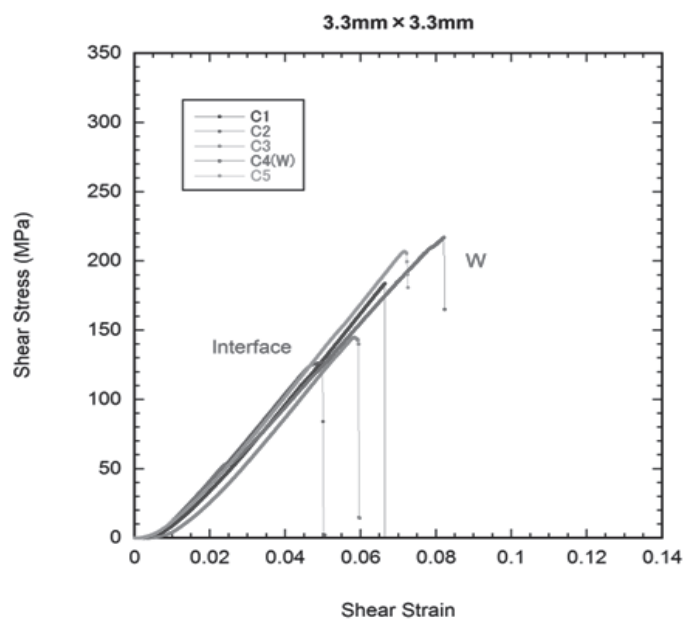


図 3：W/ODSS 液相拡散接合（TLPB）後の接合界面せん断強度試験結果（室温）

## 多孔質金属膜における水素・ヘリウム挙動に関する研究

九州大学大学院総合理工学研究院 片山一成

## 【目的】

近年クリーンな二次エネルギーとしての水素が注目されており、水素の製造・貯蔵・輸送に関連する技術開発のため、様々な材料における水素挙動の理解が求められている。白金やタングステンは、他の金属に比べて水素溶解度がきわめて小さいという特性を有する。しかし申請者らの研究により、水素プラズマスパッタリングを利用してこれらの金属から形成される薄膜には、形成過程で多くの水素が捕捉されることがわかっている。また、ヘリウムプラズマを用いた場合は、多くのヘリウムガスが捕捉されることもわかっている。応用力学研究所とのこれまでの共同研究により、50°C程度の基板温度にて重水素プラズマスパッタリングにより形成されたタングステン薄膜は、数 nm の微結晶粒から構成され多くの空隙を有することがわかり、捕捉された水素やヘリウムの多くは微結晶粒の粒界や空隙に捕捉されていると推定される。しかしながら、堆積時の基板温度による水素捕捉量や構造の変化については明らかとなっていない。本研究では、水素・アルゴン混合プラズマを利用して、タングステンをスパッタリングし、異なる基板温度にて形成されたタングステン膜中の水素捕捉量及び構造変化を調査した。

## 【実験方法】

プラズマスパッタ薄膜作製装置の概略図を Fig.1 に示す。内径 10mm、長さ 400mm の石英管内に幅 5mm、長さ 10mm、厚さ 1mm の石英基板を設置し、石英管中央の枝管から直径 3mm、長さ約 30mm のタングステン棒(ニラコ社製、純度 99.95%)を挿入した。石英管内をロータリーポンプで真空中に排気後、モレキュラーシーブを通して水分を除去した任意の水素濃度の水素・アルゴン混合ガスを、マスフローコントローラーを介して導入した。流量を調整して所定の圧力に設定した後、コイルに 13.56MHz の高周波電力を印加しプラズマを点火した。プラズマを点火後、直流電源装置によってターゲットタングステン棒に負の電圧を印加した。この電圧印加によって、スパッタリングの促進を図った。石英管の基板設置領域外周にリボンヒーターあるいは冷媒を通したチューブを巻き、設定温度に調節しながら薄膜を形成させた。一定期間放電を継続した後、基板を取り出し質量変化をマイクロ天秤にて測定した。なお TEM 観察のため、直径 3mm の円盤状タングステン基板にも同様な手法によってタングステン膜を形成させた。タングステン膜中に含まれる元素は EDX により分析した。また石英基板とともにタングステン膜を割り、破断面を SEM 観察することで膜厚みを評価した。マスフローコントローラーの流量は、液膜流量計を用いて校正した。実験に用いた水素・アルゴン混合ガス中の水素濃度は、2, 20, 50, 80% である。ガス圧は、プラズマ下流側に設置した隔膜式圧力計にて測定した。純水素プラズマ、純アルゴンプラズマ及び水素・アルゴン混合プラズマからの発光強度をプラズマプロセスモニター

(PlasCalc-2000 : Mikropack)によって測定した。また、純水素プラズマ及び純アルゴンプラズマ中のイオン密度をダブルプローブ法により測定した。純水素プラズマ及び純アルゴンプラズマについての水素イオン密度及びアルゴンイオン密度とそれぞれの発光強度の関係から、水素・アルゴン混合プラズマ中での水素イオン密度及びアルゴンイオン密度を見積もった。ここで水素イオンは  $H_2^+$ 、アルゴンイオンは  $Ar^+$  が支配的であると仮定した。ターゲットに入射する水素イオンフラックスは、ターゲットに流れ込む電流値とプラズマ中の水素イオンとアルゴンイオンの密度比から求めた。

タングステン膜中に捕捉された水素量を定量するため、タングステン膜試料を基板ごと昇温加熱装置内に設置し Ar 雰囲気中で 200°C から 800°C まで 200°C ずつ段階的に昇温した。各温度とも水素放出が見られなくなるまで測定を続けた。タングステン膜から放出された水素はガスクロマトグラフを用いて測定した。

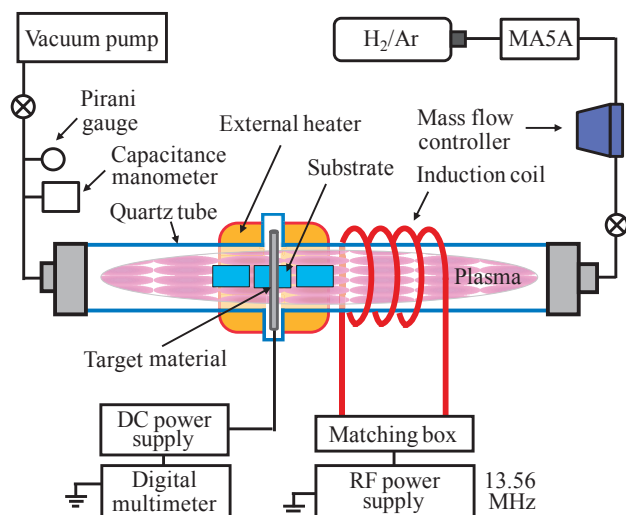


Fig.1 プラズマスパッタ薄膜作製装置概略図

### 【結果及び考察】

EDX による元素分析では、懸念されていた不純物酸素は検出されなかった。図 2 に基板温度 38°C、300°C、500°C で作製されたタングステン膜の断面 SEM 像を示す。基板温度・堆積時間以外の条件は、ガス流量 2.3sccm、ガス圧力 5.4Pa、印加高周波電力 100W、印加直流電圧-200V である。38°C 試料は個々の柱状組織が確認でき、明瞭な柱状構造を持つことがわかる。一方 300°C、500°C 試料では個々の柱状組織ははっきりとは確認できない。ただし、300°C 試料は縦方向に直線的な組織境界が見られるため、比較的緻密な柱状構造を有すると考えられる。これら基板温度による構造の違いは、飛来したタングステン原子の表面拡散に起因すると考えられる。34°C、500°C の基板温度にて同様に作製したタングステン膜の TEM 観察を行った。作製された膜厚が観察に適した厚みよりも厚かったため、今後堆積条件を調整し、改めて TEM 観察を行う予定である。そのため、予備的な TEM 観察結果ではあるが、34°C と 500°C を比較したところ共に非晶質構造でありナノオーダーでの組織の違いは見られなかった。タングステンの融点が 3400°C 程度と高いため、500°C の加熱下においても結晶性の向上が見られなかったと考えられる。

水素・アルゴン混合ガス中の水素濃度の違いにより、堆積速度や水素捕捉量に違いがみられた。水素濃度が低い場合は堆積速度が増加し、水素捕捉量は減少した。この堆積速度の向上は、アルゴンイオン密度の上昇によりスパッタ速度が促進されるためである。水素捕捉量の減少は、堆積速度すなわちタングステンの堆積フラックスが増加する一方で、水素フラックスが減少するためと考えられる。そこで、異なる水素濃度、基板温度で作製したタングステン膜中の水素捕捉量を水素フラックスとタングステンフラックスの比(H/W フラックス比)に対してプロットし Fig.3 に示す。ここでは水素フラックスとして、タングステンターゲットから反跳する水素のフラックスを用いた。反跳水素フラックスは、ターゲットに入射する水素イオンと反射係数を用いて見積もった。基板温度 58°C から 156°C の低温条件で作製された場合、H/W フラックス比依存性が最も大きく、H/W フラックス比の 0.43 乗で水素捕捉量が増加する。基板温度 300°C では 0.27 乗、500°C では 0.1 乗と整理された。

Fig.4 に各加熱温度においてタングステン膜から放出された水素量を示す。いずれの試料からも 600°C においては水素放出が見られ 800°C では水素放出が見られなかったことから、600°C 加熱により堆積層中の水素がほぼ回収できることがわかった。500°C 試料からの水素放出は 400°C から観測されているが、これは放電中にプラズマから注入された水素のうち 400°C で脱離可能な水素が放電停止後の試料温度降下過程で堆積層中に残留したことによると考えられる。

### 【成果報告】

[1] K. Katayama, Y. Ohnishi, T. Honda, K. Uehara, S. Fukada, M. Nishikwa, H. Watanabe, "Deuterium retention in tungsten deposits by deuterium ion exposure", 11<sup>th</sup> China-Japan symposium on materials for advanced energy system and fission & fusion engineering, September 11-14, 2012, Chengdu, China.

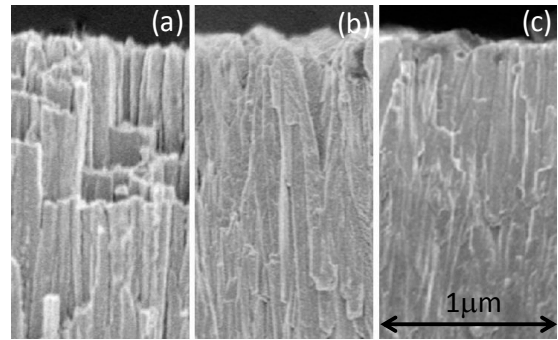


Fig.2 タングステン膜断面 SEM 像。(a)基板温度 38°C、堆積時間 21h、(b)基板温度 300°C、堆積時間 24h、(c)基板温度 500°C、堆積時間 24h.

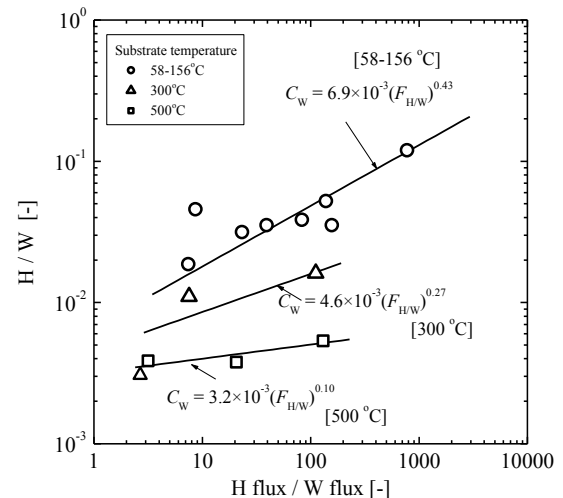


Fig.3 タングステン膜への水素捕捉量の水素/タングステンフラックス比依存性

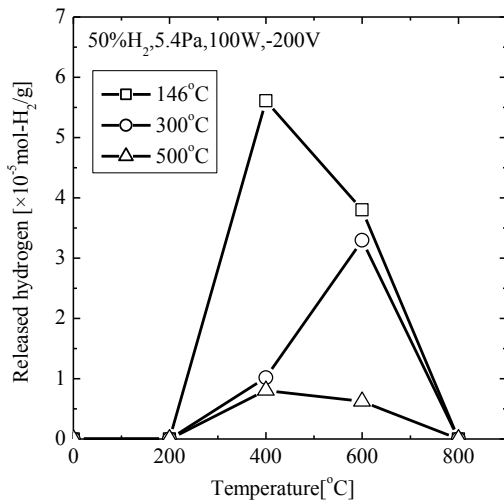


Fig.4 各加熱温度においてタングステン膜から放出された水素量

### 1. 目的

核融合炉プラズマ対向材料の第一候補材であるタングステンには、プラズマからの粒子負荷（水素同位体、ヘリウムなど）に加えて、ELM（エルム）と呼ばれる間欠的な熱負荷が加わる。パルス熱負荷が繰り返し与えられた場合には、表面温度の上昇と共に、高い熱応力が表面近傍に生じ、さらに金属疲労の影響により、結晶組織や亀裂の発生に影響を及ぼす。

そこで、本研究では、中性子照射影響が純 W 材料に比べて小さく、低温での靱性を強化した微結晶粒 W (TFRG-W) (東北大学、栗下先生製作) について、大阪大学のプラズマとパルスレーザーを同時に照射できる装置 (Laplex) を利用して、ヘリウムイオンとパルスレーザーを同時照射し、表面近傍の結晶構造の変化や亀裂の発生、あるいは材料の損耗に関する基礎的な知見を得る。さらに、TEXTOR トカマクの周辺プラズマに異なった表面温度でさらした TFGR-W 材料の分析を行う。これらの材料に対して、応用力学研究所の複合表面分析装置や水素動態観測装置を活用して、表面近傍の組織観察を行い、熱・粒子複合照射環境におけるタングステン材料の応答について理解を深める。

### 2. 実験方法・結果

TFGR-Wでは1.1TiCと3.3TiCを用いた。これらの材料は、東北大学の栗下先生が開発された材料であり、微結晶粒WにTiCやTaCを添加し、超組成加工を施すことにより、粒界を強化したタングステン材料であり、室温近傍でも延性があることが特徴である。結晶粒は1ミクロン程度の大きさであるが、高温で処理することから結晶粒は再結晶化がすすみ粒の結晶方向はランダムである。

TEXTOR プラズマ照射実験では、グラファイトのテストリミターに円形の試料（直径 22 mm）2 個（TiC 添加材と TaC 添加材）をセットし表面温度を 1500°C 程度から融点を超える範囲でさらして、表面の損傷・溶融挙動について詳しく調べた。表面からの金属不純物（Ti、Ta、W）の放出については、分光的に調べた。また、TEM 観察については、吉田先生に担当していただいた。

### 3. 実験結果

TEXTOR プラズマ照射実験では、31 ショット同じ放電にさらして、損耗や表面形状の変化を観察した。表面温度は最高で 1900°C まで上昇した。分光測定により、約 1600°C を超えると、Ti の放出が顕著になった。一方で、Ta については、もともと信号が少なく、また温度が変化してもその発生量は変化していない。Ti の放出に伴う材料の組織の変化を調べるため、断面を FIB で切断し、TEM 観察を行った(図 1、前ページ)。TiC はコントラストの違いとして明確に認識できた。表面に露出している TiC は損耗

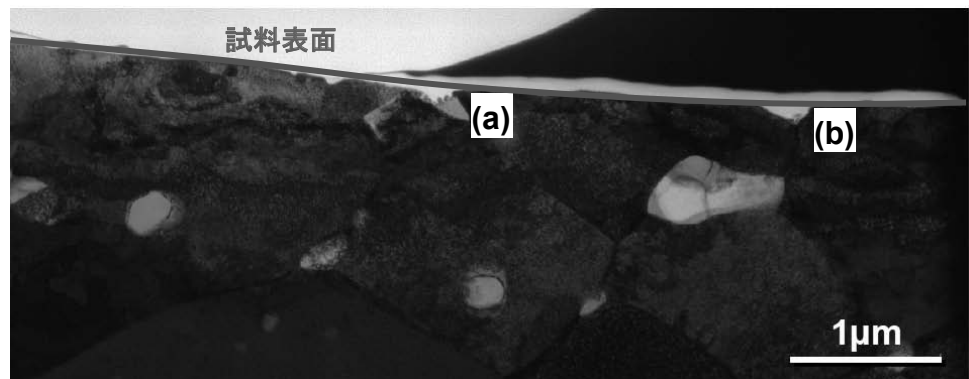


図 1 TFGR-TiC 表面近傍の組織。(a) と (b) は図 2 と対応

し、完全に失われたものもあるが、多くは表面に不純物が堆積して、損耗が抑制されたと考えられる。また、内部のTiCは変化がなかった。

図2にプラズマ照射後の表面近傍のTiCの様子を示す。図2(b)では、TiCの一部が損耗し、その上に堆積物が存在しており、コントラストからTiやCよりも重い元素の可能性がある。W上に堆積していない理由は、TiCの方が軽い元素のため、入射イオンが堆積しやすいため、と考えられる。また、Heによって生じるバブルが観測されることから、プラズマ中にHeの存在が示唆される。一方、図2(b)ではほぼすべてのTiCが損耗していることがわかる。

TiCはWに比べて軽いいためスパッタリングが起きやすく、Wより先に損耗することは定性的には理解できる。しかしながら、1600°C程度以上で損耗が顕著にみられることを考えると、これは単なる物理スパッタリングではなく、温度によりスパッタリングが促進される機構があると考えられる。TiCの融点は、3433 Kと非常に高いが、それより低い温度から熱分解が始まることが知られている。しかし、TiCの損耗はプラズマが照射される表面のみの損耗であるため、単なる熱分解とも考えにくい。プラズマ照射により熱分解や昇華が促進される現象ではないかと推察されるが、今後さらに研究が必要である。なお、パルス熱負荷実験によれば、2500°C程度まで温度が上昇すると、内部のTiCも急速に失われ、結晶粒成長が急激に進むことがわかっており、TFGR-TiCは純Wに比べると、高温の安定性は高いが、TiCが失われる温度になると純Wと大きな違いがなくなる。

一方、TaC添加材については、レーザーの熱負荷実験では、融点近傍までTaCは失われることがなく、高温での組織の安定性は、TiC添加材に比べ格段に高い。TEXTORプラズマ照射試料についても、初期的な結果であるが、TiCに比べて高温でも組織は安定しており、耐熱性についてはTaC添加材料の方が優れていると考えられる。TaC添加材については現在詳細な検討を行っているところであり、今後詳細な結果を発表していく予定である。

#### 4. 研究成果発表

1. T. Kawai, Y. Ohtsuka, Y. Ueda, H. Kurishita, N. Yoshida, “Effects of repeated short heat pulses on TFGR tungsten”, presented at 27th SOFT (Liege, Belgium) 2012.
2. 上田 他、“TFGRタングステンへの短パルス繰り返しレーザー照射実験”、プラズマ・核融合学会第29回年会、2012年11月、クローバープラザ、福岡県
3. Y. Ueda et al., “Surface erosion and modification of Toughened, Fine-Grained, Recrystallized tungsten exposed to TEXTOR edge plasma”, to be presented at 14<sup>th</sup> PFMC (Germany), May 2013.

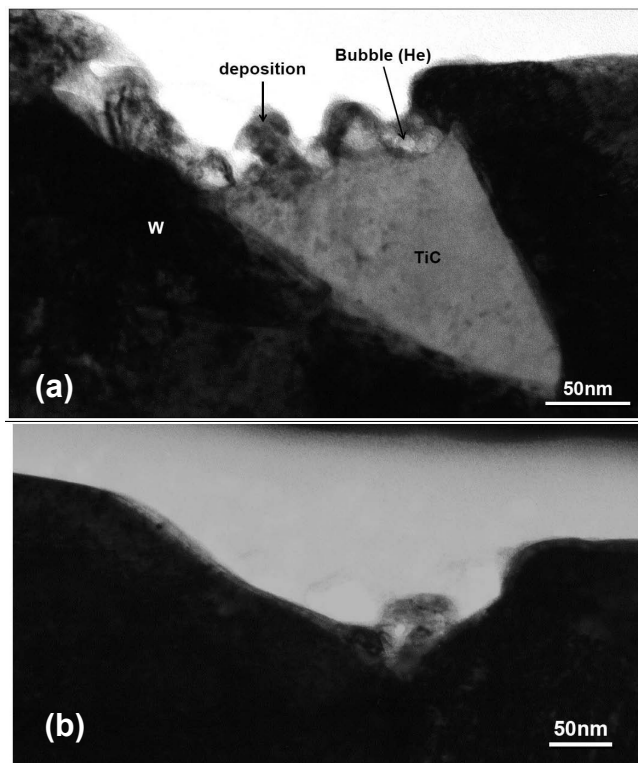


図2 プラズマ照射後の表面近傍のTiC粒の様子

### 「応力下における照射組織の発達過程に係る強度特性評価（その4）」

日本原子力研究開発機構 大洗研究開発センター  
燃料材料試験部 材料試験課

井上 利彦

#### 1. 緒言

日本原子力研究開発機構では、高速炉炉心用材料として耐スエリング性と高温強度に優れた改良 SUS316 鋼（PNC316 鋼）を開発し高速実験炉「常陽」等で実機燃料ピンとして実用するとともに、高速中性子による照射挙動を評価している。その結果、材料照射と燃料ピン照射において両者におけるスエリング挙動の明確な相違が認められている。材料照射は、材料試験片そのものを照射リグに装荷して照射しており、燃料ピン照射は実機燃料ピンでの照射を行っている。照射量と照射温度で評価した場合、両者の違いは明らかにされておらず、実機燃料ピンの環境効果が要因として推定される。具体的な要因として、温度勾配と温度変動及び内圧増加による周応力の変動等の照射環境の複合的な作用が考えられる。

本研究では、材料照射と燃料ピン照射におけるスエリング挙動の相違と要因を明らかにすることを目的とする。この複合的な環境効果の作用を評価する第1段階として、炉心用材料において応力場が組織変化に与える影響を明確にすることを目的とする。

また、機構では、耐スエリング特性に優れた高 Ni 鋼の基礎的な研究開発を行っており、本研究で得られた知見を踏まえた材料開発を目指している。高照射量及び高照射温度域でも炭窒化物や $\gamma'/\gamma$ 析出物が安定に存在していること及びボイドスエリングの照射温度依存性等を確認した。今後、耐スエリング特性が高められた高 Ni 鋼を用いて、応力を付加することにより更に照射損傷を加速させた照射試験等を試み、耐スエリング特性に及ぼす析出物の影響評価を行う。

#### 2. 実験方法

九州大学応用力学研究所設置のタンデム型イオン加速器ビームライン上に、荷重制御による小型引張試験機を設置されている動的効果観察ステーションを用いて、2.4-3.2 MeV Ni イオンの照射を行った。照射条件は室温から 600°C、負荷荷重は最大 100N とした。照射後に微細組織観察を行い応力が与える照射欠陥集合体の離合集散状態を応力無負荷の試料と比較した。供試材はオーステナイト鋼である JPCA2（焼鈍材）を用いた。

高 Ni 鋼（15Cr-43Ni、 $\gamma'/\gamma$ 弱析出型）を供試材として、タンデム型イオン加速器を用いた 2.4MeV Cu イオンの照射を行った。照射条件は 700、800°C、200dpa とした、応力無

負荷での微細組織観察試料とした。H24 年度は、JAEA 高崎量子応用研究所イオン照射研究施設(TIARA)にてイオン照射した試料に関して FIB を用いて微細組織観察試料に加工し、微細組織観察を行った。

### 3. 結果

応力無負荷及び応力負荷試料の両者の微細組織を比較した結果を図-1 に示す。図 1 の上段には応力無負荷試料を示し、下段には 25N で応力を負荷したまま照射温度 400°C、照射量 5dpa まで照射した試料を示す。応力なしの状態では、損傷ピークの近傍にのみ格子間原子型の転位ループが形成されるが、照射中に 25N の応力を負荷すると転位ループ密度が少ない領域においても高密度の転位が形成され、応力負荷の影響が広範囲にまで及ぶことが示された。

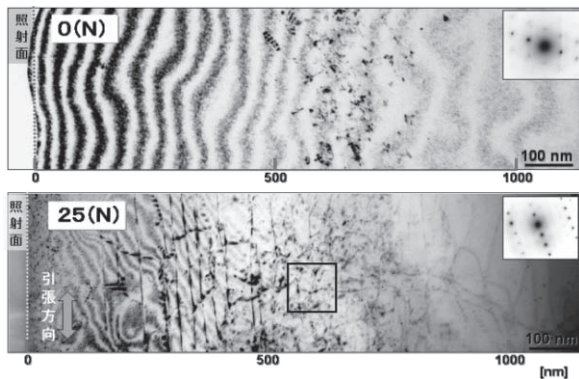


図 1 照射試料断面の微細組織観察結果 (400°C, 5dpa)

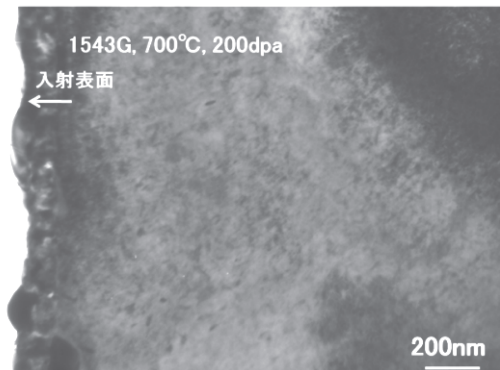


図 2 照射した高 Ni 鋼試料断面の微細組織観察結果 (700°C, 200dpa)

応力無負荷における高 Ni 鋼 (15Cr-43Ni、 $\gamma'/\gamma''$ 析出型) の 700°C、200dpa における微細組織観察の結果を図 2 に示す。高温及び高照射量の条件下において  $\gamma'/\gamma''$  ( $\text{Ni}_3(\text{Ti,Al})/\text{Ni}_3\text{Nb}$ ) 析出物は安定に存在していた。また、高 Ni 鋼 (15Cr-35Ni 鋼：炭窒化物析出型、15Cr-43Ni 鋼： $\gamma'/\gamma''$ 析出型) 及び相対比較材の PNC316 鋼のボイドスエリングの照射温度依存性を図 3 に示す。照射下における高 Ni 鋼の基礎的な挙動評価に関する知見を得た。今後、応力負荷環境における照射試験を行い、損傷形態を比較することによって、耐スエリング特性に及ぼす高 Ni 化や析出物の影響評価を行う予定である。

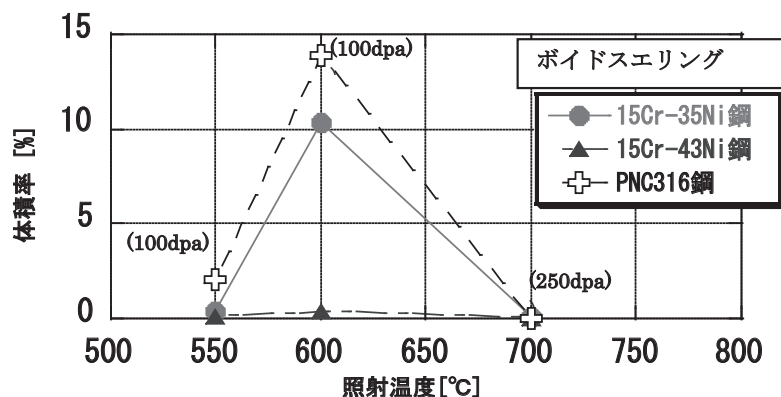


図 3 高 Ni 鋼のボイドスエリング特性の照射温度依存性 (図中の括弧内は照射量を示す)

平成 24 年度 応用力学研究所 共同研究

「プラズマ輸送理論」 成果報告書

代表者 核融合科学研究所 伊藤公孝

### 研究目的

核融合燃焼プラズマ実験の実現にむけて計画が進展している現在、トロイダルプラズマの輸送理論を一層進展させ、統合コードなどへ成果を糾合することによって定量的予言力を検証することは世界的な急務と認識されている。

本研究では、トロイダルプラズマの乱流に対し、繰り込み理論に基づく遷移理論を構成し、乱流輸送と構造形成の理論基盤を研究することを目的とする。あわせて、輸送コードに用いられる理論式を最新の理論展開に沿ったものへと高度化することを目的とする。

### 研究基盤と進展の概観

プラズマの構造形成や乱流状態では、エネルギー等分配則が成り立たない事が知られており、従来の統計力学では十分解析できない。本共同研究では、そのようなプラズマに相応しい、エネルギー分配やダイナミクスを解明するため、非平衡系プラズマの統計力学を構築する事を目指す[1]。

### 多種の揺動構造の競合の理論

具体的な例として、Inagaki, et al.に報告された長波長揺動[2]の問題を取り上げ、励起強度の等分配からの逸脱を検討する。Inagaki らによる発見は、乱流揺動シグナルの大域的な相関を観測する事によって求められたものであり、局所的な熱平衡の破れや輸送現象での局所クロージャーの破れを議論するための典型的な例となる。

多スケール乱流の理論は近年展開を見せ、ドリフト波—帯状流の系に定式化が行われた。この系は磁場閉じ込めプラズマの乱流と異常輸送を考察するための基本的な体系である。一方、Inagaki らの発見は、(帯状流と異なって) 磁気面上で均一ではない巨視的な揺動が実在する事を示した。この場合、巨視的モードが線形安定である事に変わりはなく、巨視的モードの励起が微視的なドリフト波からエネルギーを取り去る事は共通である。しかし、帯状流とは異なり、巨視的なモード自体が揺動輸送を励起する。巨視的モードの誘起が全体として乱流輸送を増やすのか否か、分析が必要である。更に、巨視的モードによる輸送流束は、局所的な(拡散的な)輸送現象とは全く異なる輸送現象をもたらす。

ドリフト波とこの巨視的なモードの競合関係を実験で確認した[3]。[2]に示された実験観測データについてドリフト波揺動強度 $I_d(t)$ と、長波長モードの振幅 $I(j)$ のリサージュ

図を図 1 に示す。最少二乗法によるフィットでは

$$\frac{I_d(t)}{\langle I_d \rangle} = 1.068(\pm 0.016) - 0.068(\pm 0.014) \frac{I_l(t)}{\langle I_l \rangle}$$

との結果を得て、負の相関を確認した[3]。ここで  $\langle I_d \rangle$  と  $\langle I_l \rangle$  は  $I_d(t)$  と  $I_l(t)$  の長時間平均値である。ドリフト波揺動のエンベロップを観測し、その周波数スペクトルを図 2 に示す。低周波揺動の周波数でモジュレーションを受けている事が実証された。

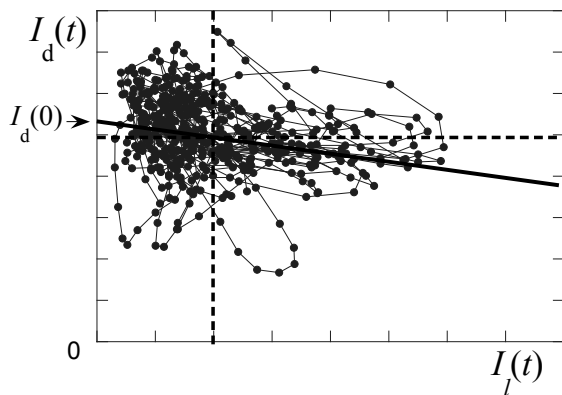


図 1：巨視的モードとドリフト波揺動振幅  $I_l(t)$ 、 $I_d(t)$  のリサーチ。点線は平均値、実線は最少二乗法によるフィッティング。

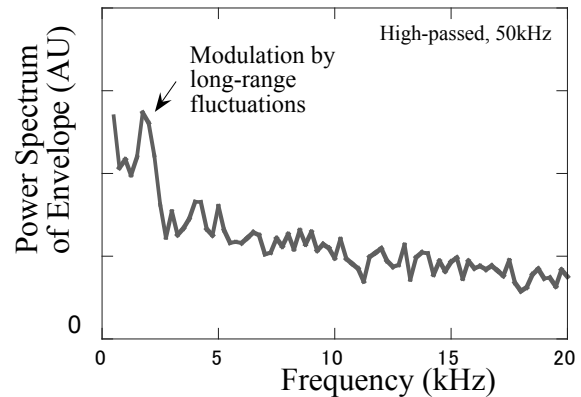


図 2：周波数スペクトルを図 2 に示す。低周波揺動の周波数でモジュレーションを受けている [3]

## 森肇先生記念研究集会「非線形・非平衡系の統計力学」

この共同研究に於いて、森肇先生記念研究集会「非線形・非平衡系の統計力学」を共催として開催した（於、九州大学応用力学研究所、2012年11月23日（金））。

かねてより森先生が九州大学応用力学研究所での本共同研究に参加下さり、ともに議論をする機会を得た。この共同研究の中から森先生は「記憶関数と相関関数の相似性」の考察を進めた。一方、乱流中の非線形過程で励起される多数の揺動や不安定なモードを解析する「乱流を着たモードの解析」というモデルがある。同方法を森の方法によって基礎づける事により、乱流場への外力の効果を解析し非線形応答が得られた[4]。

この研究会ではプラズマ物理学から非平衡系の統計力学を対象にし、プラズマ輸送理論に関する大きな進展を得た。発表プログラムを添付する。

## 引用文献

- [1] P. H. Diamond, S.-I. Itoh, K. Itoh: *Physical Kinetics of Turbulent Plasmas*, (Cambridge University Press, 2010) 570 pages
- [2] S. Inagaki et. al., *Phys. Rev. Lett.* **107** (2011) 115001
- [3] K. Itoh, et al.: *Plasma Phys. Control. Fusion* **54** (2012) 095016
- [4] S.-I. Itoh and K. Itoh: *Chin. Phys. B* **21** (2012) 095201

森肇先生記念研究集会 - 非線形・非平衡系の統計力学-  
九州大学応用力学研究所 2012年11月23日（金）プログラム

10:00-10:10 開会挨拶

伊藤早苗(九州大学副学長、九州大学応用力学研究所) 山田知司(九州工業大学名誉教授)

「森肇先生とのカオス研究」座長：森信之（九州看護福祉大学）

10:10-10:40 保存力学系のカオスと輸送現象

石崎龍二(福岡県立大学人間社会学)

10:40-11:10 カオスのフラクタル構造から軌道拡大率の揺らぎ

秦浩起(鹿児島大学大学院理工学研究科)

11:10-11:20 休憩

11:20-11:50 射影演算子法の大偏差統計関数導出への応用

宮崎修次(京都大学情報学研究科複雑系科学専攻)

11:50-12:20 カオス・乱流の時間相関関数

岡村誠(九州大学応用力学研究所)

12:20-14:00 昼食

「非線形・非平衡系の統計力学に関する研究交流」

14:00-15:00 ポスターセッション

「森肇先生との研究の交わり」座長：黒木昌一（福岡女子大学）

15:10-15:40 パターン・エントロピー時系列法の開発と応用例

井上政義(鹿児島大学名誉教授)

15:40-16:10 森理論とプラズマ乱流研究について

伊藤早苗(九州大学副学長、九州大学応用力学研究所)

16:10-16:20 休憩

16:20-16:50 モード結合理論への道

川崎恭治(九州大学名誉教授)

16:50-17:20 集団同期現象をめぐって

蔵本由紀(京都大学数理解析研究所)

17:20-17:30 閉会挨拶 吉田健（九州大学・福岡工業大学元教員）

## ポスターセッション一覧

- P1. 「液晶電気対流系での二重構造」  
鳴海孝之(九州大学工学研究院)
- P2. 「低温下の概日リズム」  
伊藤浩史(九大芸工), 村山依子(早稲田理工), 八木田和弘(京都府医)
- P3. 「非ガウス性に起因する熱伝導」  
金澤輝代士(京都大学基礎物理学研究所), 沙川貴大(京都大学基礎物理学研究所, 京都大学白眉プロジェクト), 早川尚男(京都大学基礎物理学研究所)
- P4. 「両面テープの剥離ダイナミクス」  
山口哲生(九大工)
- P5. 「森の射影演算子法による相対論的線形流体方程式の導出」  
南佑樹(理研), 日高義将(理研)
- P6. 「結合振動子系の集合ダイナミクス」  
前山聡美(九州大学総合理工学府), 坂口英継(九州大学総合理工学府)
- P7. 「Lorentz 対称性がない場合の南部-Goldstone の定理」  
日高義将(理研)
- P8. 「ネットワーク上の情報熱力学」  
伊藤創祐(東大理), 沙川貴大(京大白眉センター)
- P9. 「調和振動子における速度時刻相関の波数依存性」  
August Wierling(University of Rostock (Germany)), 沢田功(香川高専)
- P10. 「電力網の位相モデルにおけるカスケード故障」  
松尾龍磨(九州大学総合理工学府), 坂口英継(九州大学総合理工学府)
- P11. 「租視化により隠れるエントロピー生成と非平衡関係式」  
川口喬吾(東京大学理学系研究科物理学専攻), 中山洋平(東京大学理学系研究科物理学専攻)
- P12. 「縮約にともなう物理量の変化と非平衡熱力学第二法則」  
中山洋平(東京大学理学系研究科物理学専攻), 川口喬吾(東京大学理学系研究科物理学専攻)
- P13. 「Duffing 系の記憶関数」  
富永広貴(佐賀大医)

### 1. はじめに

国際熱核融合実験炉 (ITER) でのトムソン散乱計測では、パルスレーザー用金属ミラーのレーザー誘起損傷閾値 (LIDT) の調査が重要な課題となっている。高出力パルスレーザー (Nd:YAGレーザー) 照射によって、一旦金属ミラーが損傷を受けると光学特性が著しく劣化してしまうためである。懸念の一つとして、中性子とレーザーとの複合照射による損傷閾値の劣化が挙げられる。光学的な劣化は極めて少なかったとしても、繰り返しのパルスのレーザー照射に耐えうる必要があり、中性子照射により損傷閾値が下がった場合には、ミラーの寿命を著しく短くしてしまう可能性がある。しかし、これらの特性の調査例は少なく、中性子照射効果に関しては、データは皆無である。本研究では、特に、九州大学が所有する重イオンビームを利用し、中性子照射模擬実験を実施し、金属ミラー材料へのレーザー損傷閾値に与える影響を実験的に調査した。

### 2. 実験方法

九州大学のタンデム加速器を用いて、純銅ミラーに対して  $2.4\text{MeV}\text{Cu}^{2+}$  のイオンビームを照射した。純銅ミラーの  $\text{Cu}^{2+}$  イオンビームによる損傷量の深さ分布は、SLIM 2012 code を用いて計算した。ピーク損傷量が  $5.5\text{ dpa}$  の試料の損傷量  $\text{dpa}$  の深さ分布を図1に示す。ピーク損傷量が  $5.5\text{ dpa}$  の試料のイオン平均飛程は  $758\text{ nm}$  であり、損傷ピーク位置は  $680\text{ nm}$  であった。表面から  $1100\text{--}1200\text{ nm}$  付近までイオンビームによる損傷があると計算された。 $\text{Cu}^{2+}$  イオンビーム照射純銅ミラーの断面組織写真を図2に示す。試料の断面を観察すると、表面から  $1100\text{ nm}$  付近まで損傷を受けていると見受けられ、計算結果と一致していた。

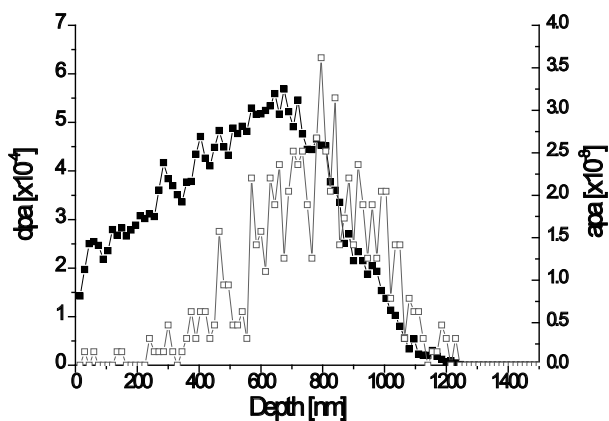


図1  $\text{Cu}^{2+}$  イオンビーム照射純銅ミラーの  $\text{dpa}$  の深さ分布。

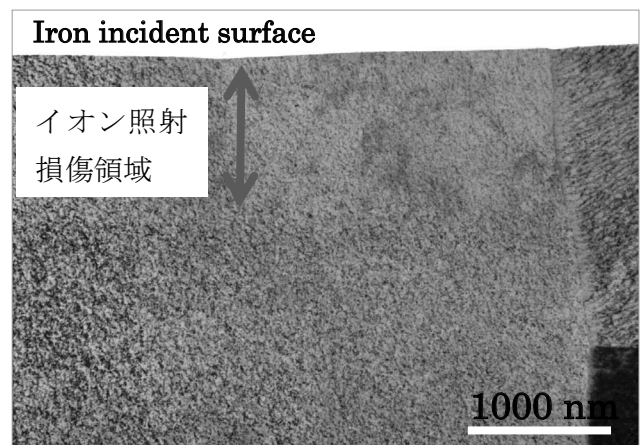


図2  $\text{Cu}^{2+}$  イオンビーム照射純銅断面の写真。

### 3. 実験結果

イオンビーム照射銅における損傷閾値の計測を実施した。本実験では Nd:YAG レーザーを利用し、集光した YAG レーザー光を銅ミラーに照射し、反射率の変化から LIDT を評価した (図3)。イオンビー

ム照射銅の LIDT はイオンビーム未照射試料の LIDT より高かった。一般的に、重イオンビーム照射がなされると金属表面の硬度が増すが、この実験においても、重イオンビーム照射により表面硬度が増加し、LIDT が増加した可能性が示唆される。

レーザー照射時間内の熱拡散距離は  $\sqrt{\alpha\tau}$  で見積もられる。 $(\alpha$ : 熱拡散率,  $\tau$ : レーザーパルス幅) 銅の熱拡散率は  $1.059 \text{ cm}^2/\text{s}$ , パルス幅は  $5\text{-}7 \text{ ns}$  であるため、熱拡散距離は  $0.8 \text{ }\mu\text{m}$  程度であり、重イオンビームの平均飛程距離と同等である。より深い領域までイオンビームで損傷を与える実験も重要と思われるが、損傷が十分に進行していない領域では、本イオンビームの模擬実験により十分に欠陥の影響が模擬できていると思われる。本実験から、高パルス領域( $10^4\text{-}10^5 \text{ pulse}$  の領域)のマルチパルス損傷閾値に対する中性子負荷の影響は小さいと考えられる。

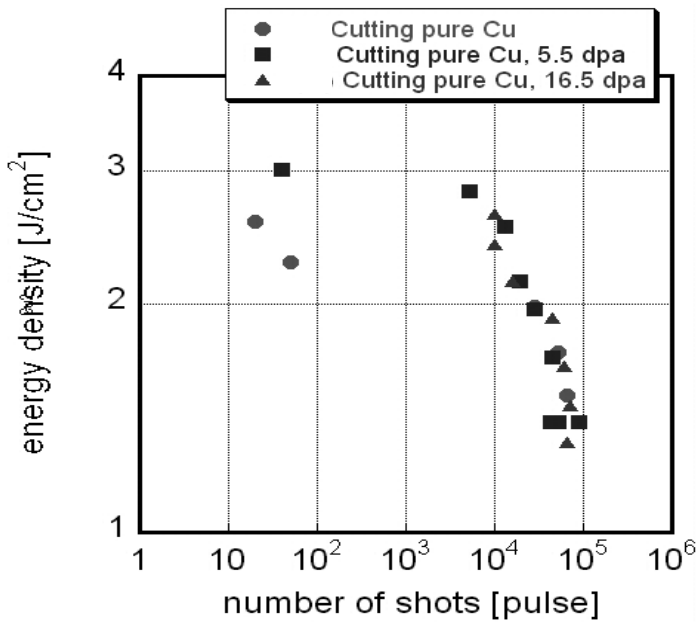


図3 中性子模擬照射銅のマルチパルス損傷閾値調査

成果報告 (論文, 学会発表等)

- (1) 佐藤雅也, 梶田信, 安原亮, 大野哲靖, 時谷政行, 吉田直亮, 田原譲 : “トムソン散乱計測用金属ミラーのマルチパルスレーザー損傷閾値” 第9会核融合エネルギー連合講演会 (29A-34p, 神戸国際会議場) 2012年6月.
- (2) M.Sato, S. Kajita, R. Yasuhara, N. Ohno, M. Tokitani, N. Yoshida, and Y. Tawara : “Multi pulse laser damage threshold of Cu and Ag mirrors”, The 6<sup>th</sup> International Conference on PLAsma NanoTechnology & Science (P-H1, Gero Synergy Center)
- (3) Masaya sato, Shin Kajita, Ryo Yasuhara, Noriyasu Ohno, Masayuki Tokitani, Naoki Yoshida, and Yuzuru Tawara "Assessment of multi-pulse laser-induced damage threshold of metallic mirrors for Thomson scattering system" submitted.

## ドリフト波乱流中の渦構造に関する 非線形シミュレーション研究

Nonlinear simulation on vortex structures in drift wave turbulence

富山大学・人間発達科学部 成行 泰裕

### 研究目的：

核融合プラズマ中には圧力・密度・温度勾配が普遍的に存在し、それらによってドリフト波乱流が励起される。このようなドリフト波乱流を記述する基本的な方程式としては、Hasegawa-Mima 方程式がよく知られている。近年、熱の輸送現象に大きく寄与するドリフト波のミクロスケールの揺動の「寄り集まり(バンチング)」によって生じる周方向の流れの塊(ストリーマー)が 実験室プラズマ中で観測され、さらにこのストリーマー構造が Hasegawa-Mima 方程式から導かれる非線形方程式のソリトン解(渦構造)に対応していることが指摘された。

本研究では、前年度の共同研究を通じて、(1)反磁性ドリフトを考慮した多種イオンプラズマ中の Hasegawa-Mima 方程式からの KdV 方程式の導出およびソリトン解の温度比・イオン組成への依存性の評価、(2)イオン-電子温度比を含む Hasegawa-Wakatani 方程式からの VZSC モデルの導出、を行った。本年度は、導出したイオン-電子温度比を含む VZSC モデルの数値シミュレーションを行う。

### 研究方法：

本研究の推進に当たっては、それぞれの研究グループが理論的・数値的に発展させた結果について、定期的に筑紫キャンパスに参集して議論を行うことを基本としている。

### 研究成果：

本年度は前年度導出した有限温度比を含む小数自由度モデル (modified VZSC モデル) の基本的な性質を議論した[1]。まず初めに、系の平衡点を解析的に求め、温度比に対する依存性を確認した。次に、4 次のルンゲクッタ法を用いて数値的に系の時間発展を議論した。図 1 は温度比に関する量( $a=1+\tau$ ,  $\tau$ : イオン-電子温度比)で規格化したレイノルズ数( $R'$ )に対する分岐図である。赤い線は  $\tau=0$ 、青い線は  $\tau=0.5$  をそれぞれ表している。図 1 は 4 周期に分岐した所から示しているが、 $R'$  が大きくなるにつれて周期倍分岐を生じカオスへ至っていることが確認できる。赤い線と青い線の比較では、それぞれ値に違いはあるものの、 $R'$  に対する分岐の依存性は変わらないことが分かる。ただし、この場合の  $R'$  は実際のレイノルズ数  $R$  に  $a$  を掛けた量であるため、温度比 (イオン温度) が大きくなるほど小さいレイノルズ数  $R$  でカオスへの遷移が生じることになる。すなわち、有限の温度比の効果により、層流状態から乱流状態へ至るレイノルズ数の閾値が下がることになる。

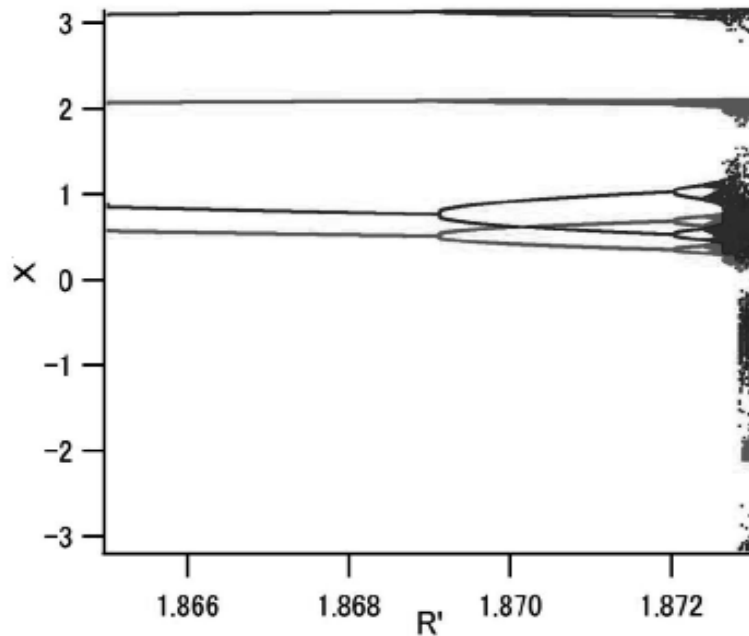


図1 規格化したレイノルズ数に対する分岐図（詳細は本文参照）

また、VZSC モデルはレイノルズ数をある程度上げていくと解が発散することが知られているが[2]、一部の項に対してのみ温度比の効果を入れることでレイノルズ数を上げても発散しなくなることが分かった。今後は、この操作の物理的意味の解明やフィードバックなどを含む系[3]の解析、および統計的性質の解析[4]などが課題となる。

## 引用文献

- [1]福永航平, 平成 24 年度高知工業高等専門学校特別研究論文集 (印刷中) (in English)
- [2] A. A. Vasil'ev et al, Sov. J. Plasma Phys., 16(10), 1990.
- [3] C. F. Figarella et al, Plasma Phys. Control Fusion, 45, 1297-1308, 2003.
- [4] D. Hamada, Master's Thesis of Interdisciplinary Graduate school of Engineering Science, Kyushu University, 2007.

## 公表状況：

なし（\*2013年3月15日に下記講演予定）

福永航平、成行泰裕、谷澤俊弘、佐々木真、矢木雅敏、“イオン - 電子温度比を含むドリフト波乱流モデル”，名古屋大学太陽地球環境研究所研究集会「雷・超高層放電の科学」

## 研究組織：

成行泰裕（富大・人間発達）、福永航平（高知高専・専攻科）、谷澤俊弘（高知高専）、佐々木真（九大・応力研）、矢木雅敏（原研）、羽田亨（九大・総理工）

## 24 FP-20

### タングステン中の水素同位体保持特性に及ぼす照射欠陥の影響

富山大学 水素同位体科学研究センター 波多野雄治

#### 1. はじめに

核融合炉プラズマ対向材料としてタングステン(W)が有望視されており、安全性の観点からトリチウム保持特性の解明が急務となっている。著者らは日米科学技術協力事業 TITAN 計画のもとで中性子照射 W 中の水素同位体保持特性を調べ、欠陥の捕獲効果により照射前に比べ水素同位体保持量が著しく増大することを見出し、保持量低減とトリチウム除去法の開発に向けた研究の必要性を提言している[1, 2]。一方、中性子照射は照射条件の制約が大きく、試料の放射化などの問題もあり、実験精度には限界がある。また、照射キャプセル体積の制限から、試験できる材料種もおのずと限定される。そこで、並行したイオン照射による広範かつ精緻な実験が不可欠と考え、本共同研究を推進している。今年度は微量の Re 添加が水素同位体保持特性および微細組織に与える影響を調べた。

#### 2. 実験

試料にはアライドマテリアル社製の 4.6 質量%の Re を含む W 板材（以下、W-5Re）および純度 99.99% の純 W 板材を用いた。これらの試料に室温および 600°C で 20 MeV の W イオンを 0.5 dpa（損傷ピーク深さでの値）まで照射した。そのうち、673 K で 1.2 または 100 kPa の D<sub>2</sub> ガスに 10 時間曝露し、D の深さ方向分布を核反応法（NRA）で分析すると共に、昇温脱離スペクトルを測定した。また、あらかじめ薄膜化した直径 3 mm の W-5Re ディスクに 2.4 MeV の Cu イオンを 0.25～1 dpa 照射したのち、TEM 観察を行った。

#### 3. 結果及び考察

W イオン照射した純 W および W-5Re 試料中の D 濃度及びはじき出し損傷の深さ方向分布を図 1 に示す。表面から約 2 μm の領域まで照射損傷が導入されると共に、その領域中で D 濃度が著しく高くなっており、照射欠陥に D が捕獲されていることがわかる。はじき出し損傷量が最大となる深さ（約 1.4 μm）における D 濃度に及ぼす Re 添加、照射温度、D<sub>2</sub> ガス曝露温度の影響を図 2 に示す。いずれの試料においても 873 K で照射すると室温で照射した場合に比べ D 濃度が低下している。これは、高温では欠陥の拡散が活発となり、照射中に一部の欠陥が消滅するためと考えられる。興味深いことに、純 W と比べ W-5Re 中の D 濃度は常に低い値となっている。また、図 3 は 873 K で照射した試料からの D の昇温脱離スペクトルであるが、W-5Re からの D 脱離開始温度は純 W に比べ約 150 K も低い。これらの結果は、水素同位体捕獲サイトとして働く照射欠陥の密度および欠陥からの水素同位体の脱離エネルギーが共に Re を添加することにより低下することを示している。すなわち、Re 添加はトリチウム保持量を低減する効果があると期待される。

照射前および Cu イオンを室温で 1 dpa 照射したのちの TEM 像を図 4 に示す。照射により、微細な空孔クラスターが多数形成されており、これら空孔クラスターが主要な D 捕獲サイトとして働いていると考えられる。今後、空孔クラスターのサイズ分布等を調べ、上述のような Re 添加や照射温度依存性が現れたメカニズムを考察する予定である。

なお、本研究の一部はドイツ・マックスプランクプラズマ物理研究所との共同研究としても実施された。ここに謝意を表す。

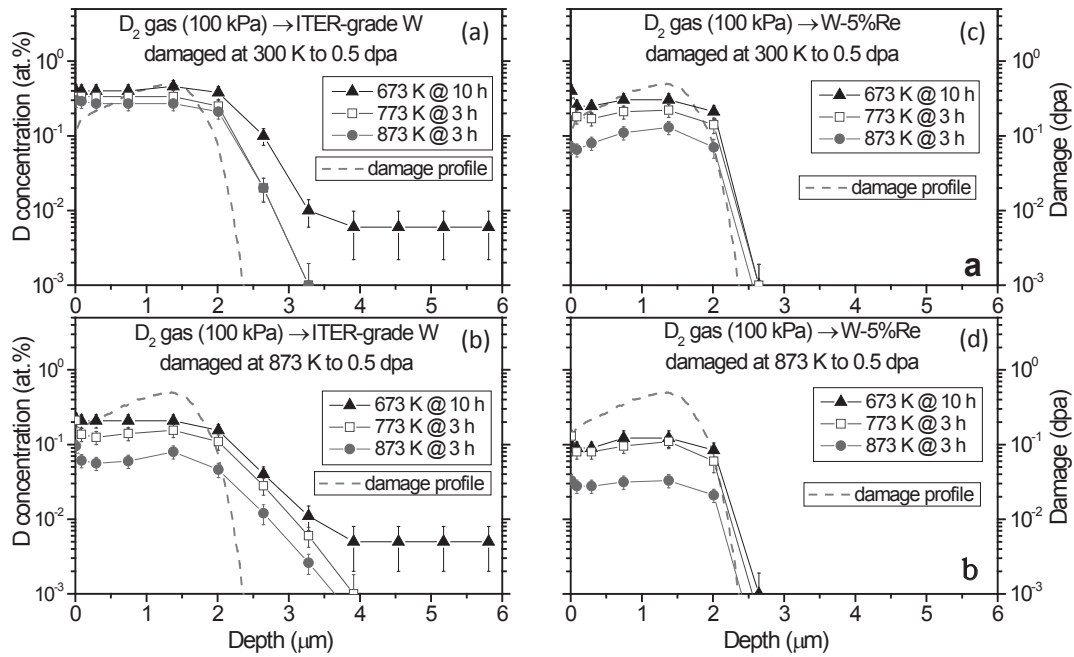


図 1 W イオンで照射したのち D<sub>2</sub> ガスに曝露した W (左列) および W-Re 合金 (右列) 試料中の D の深さ方向分布およびはじき出し損傷分布. 照射温度は上段が室温、下段が 873 K.

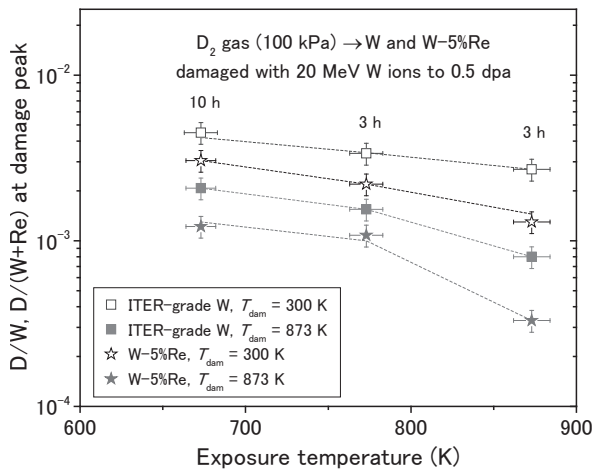


図 2 損傷ピーク深さでの D 濃度に及ぼす照射温度、D<sub>2</sub> ガス曝露温度および Re 添加の影響.

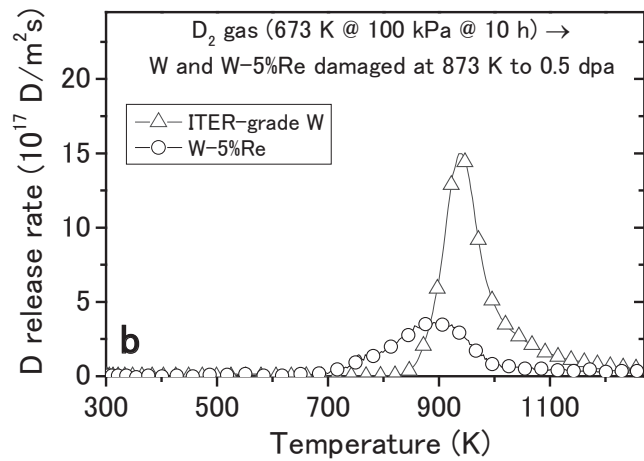


図 3 873 K で照射損傷を導入した W および W-Re 合金試料からの D 脱離スペクトル.

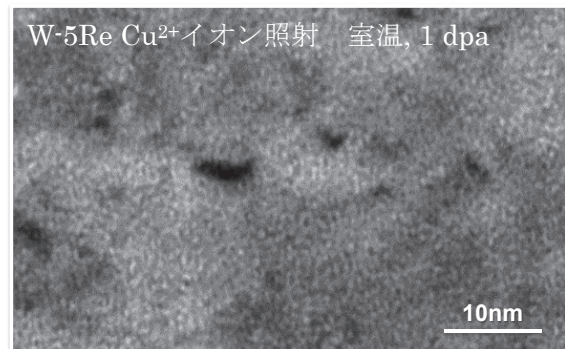
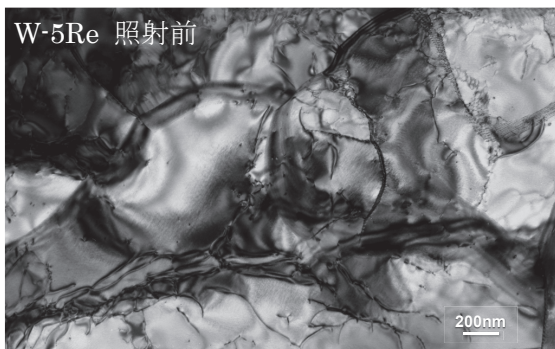


図 4 照射前 (右) および室温で Cu イオンを 1 dpa 照射したのち (左) の W-5Re 試料の TEM 像.

## 圧力容器鋼の磁気特性に与えるイオン照射効果

岩手大学工学部マテリアル工学科 鎌田康寛

### 目的

東日本大震災による福島原発事故以後、原子力政策に慎重になる国がある一方、世界では約 400 基の商業炉が稼働中であり、さらに新興国での相次ぐ新設など、原子力分野での安全性の重要性は変わらない。それに関連して、我々のグループでは、照射環境下での圧力容器鋼および炉内構造物の脆化機構の解明と、それに基づく健全性評価法の確立に関する研究を進めてきた。特に磁気利用による脆化の非破壊評価の可能性を検討しており、そのためには磁気特性に与える照射欠陥形成の影響の解明が必要である。しかし、原子炉を使う中性子照射では系統的な実験が難しく、さらに放射化するため通常の設定で試料を扱えないという問題があった。それらを解決する新しい手法としてイオン照射と単結晶薄膜試料の組み合わせを提案している(科研費・基盤研究 B、No23360418)。カスケード損傷が起こるイオン照射では中性子照射と似た損傷組織が得られると同時に、試料が放射化しない利点を有する。損傷深さが浅いという欠点があるが、試料全体が損傷を受ける薄膜の利用で照射領域の物性測定が容易になる。さらに単結晶を利用することで複雑な粒界の影響を除くことができ、相関機構の解明が容易になる。このような考えに基づき、単結晶鉄クロム薄膜における Fe-20%Cr 二相分離の照射促進現象の可能性を H22-23 年度に報告した。本年度は、磁気特性の照射量依存性とクロム濃度依存性について検討を行った。

### 方法

単結晶試料の作製は、MBE 法(到達真空度  $2 \times 10^{-10}$  Torr)を用いて行った。MgO(001)単結晶基板上に Fe-x%Cr (x= 5,10,15,20)を 30 nm 蒸着した。RHEED 観察より、良質な単結晶薄膜の形成を確認した。イオン照射は、タンデム型加速器(九州大学応用力学研究所)を用いて、475°C で 1h 保持し、 $\text{Cu}^{2+}$ (2.4 MeV,  $1.6 \times 10^{-4}$  dpa/s)を照射した。照射時間は Fe-20%Cr で 5, 15, 45min、Fe-x%Cr (x= 5, 10, 15, 20) は 15min とした。SRIM 計算より、損傷度は 15min 照射で 0.14 dpa と見積もられた。照射した  $\text{Cu}^{2+}$ は薄膜を貫通し基板に達するため、残留イオンの影響は無視できる。磁気特性評価として、VSM を用いて磁化測定(最大磁界 2 kOe)を行った。

### 結果および考察

Fe-20%Cr 単結晶薄膜の印加磁化方向を変えて磁化測定を行ったところ、純鉄と同様に、 $H//[100]_{\text{Fe-Cr}}$ 、 $H//[110]_{\text{Fe-Cr}}$ がそれぞれ磁化容易、磁化困難方向であることを確認した。図 1 に照射量 0 から 0.43 dpa までの磁化曲線を示す。飽和磁化はほとんど変化ないが、保磁力は照射量とともに増加している。照射による過剰空孔の形成で 2 相分離が促進し、Cr リッチ析出物が形成・成長したことを反映している可能性がある。図 2 に保磁力の照射量依存性を過去の実験値 ( $2.3\text{dpa}$ ,  $2.4 \times 10^{-3}$  dpa/s)とあわせて整理した。保磁力が硬度増加に比例し(バルク Fe-20%Cr の熱時効実験で確認済[参

考文献])、さらに照射量の平方根に比例すると仮定した場合の曲線をプロットした。高照射量（高フラックス）で曲線から外れており、フラックス効果の可能性もあるが今後検討が必要である。

Fe-x%Cr (x=5, 10, 15, 20)の未照射・照射 (0.14dpa) 試料の飽和磁化は、照射前後で変化は見られなかった。一方、保磁力については、5%Cr から 15%Cr 合金では測定誤差の範囲で変化は無かったが、20%Cr 合金では照射により増加した(図 3)。この照射条件では 15%以下では二相分離がほとんど進行していない可能性がある。

今年度は、さらに直線駆動シャッターと専用ヒータ試料台を新しく据え付けることで、コンビナトリアル型照射実験にも成功した。実験条件を系統的に変え、磁性に与える照射効果を解明したい。

参考文献 : J. Mohapatra, Y. Kamada, 他 5 名: Effect of Cr-Rich Phase Precipitation on Magnetic and Mechanical Properties of Fe-20%Cr Alloy, IEEE Trans. Mag. 47 (2011) pp.4356-4359.

成果報告 : Y. Kamada, H. Watanabe, S. Mitani, J. Mohapatra, H. Kikuchi, S. Kobayashi, M. Mizuguchi and K. Takanashi : Ion-Irradiation Enhancement of Materials Degradation in Fe-Cr Single Crystals Detected by Magnetic Techniques, Journal of Nuclear Materials, 2013, *in press* ほか

研究組織 : 鎌田康寛, 菊池弘昭, 小林悟, 村上武 : 岩手大学工学部マテリアル工学科  
渡辺英雄 : 九州大学応用力学研究所

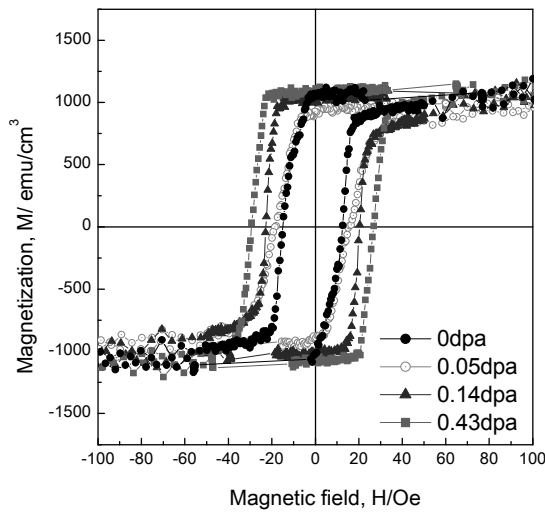


図 1 Fe-20%Cr の磁化曲線

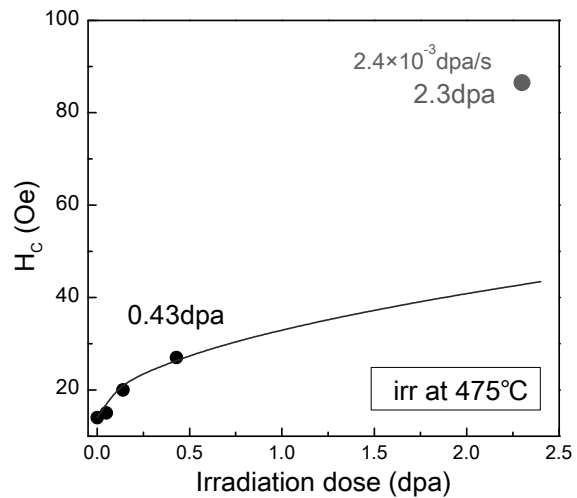


図 2 Fe-20%Cr の保磁力の照射量依存性

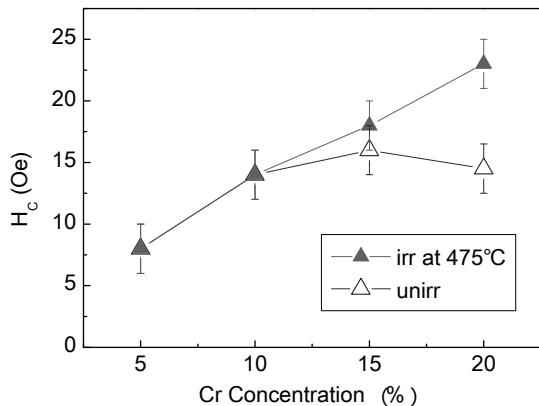


図 3 Fe-x%Cr の照射前後での保磁力の変化(0.14dpa)

## 24 FP-22

タングステン混合堆積層における炭素・ヘリウムと照射欠陥分布と水素同位体滞留挙動の相関関係

静岡大学 理学部 大矢恭久

### 【目的】

D-T 核融合炉におけるプラズマ対向壁として、高融点・低スパッタ率等の特徴を持つタングステンの使用が考えられている。対向壁にはプラズマから漏えいた高エネルギー水素同位体が照射され、照射欠陥が形成する。形成した照射欠陥には水素同位体が捕捉され、壁中に滞留することが予想されている。そのため、核融合炉の運転時間増加に伴い欠陥量およびタングステンの構造が変化し、水素同位体滞留挙動に影響することが考えられる。また、プラズマ中には不純物として炭素が混入することが考えられ、水素同位体と同時に第一壁に照射され、欠陥やタングステン炭素混合層を形成することが予想される。それらの構造変化により第一壁中の水素同位体滞留挙動が変化し、核融合炉における燃料サイクルに影響を及ぼす。核融合炉の定常運転のためには、混合層形成が及ぼす水素同位体滞留挙動への影響の解明は重要な課題である。そこで本年度は、タングステンに重水素イオンを照射し、TEM 観察および TDS 測定により形成した欠陥状態および重水素滞留挙動の解明を行った。加えて、照射温度を変化させて炭素照射したタングステンに重水素照射を行い、XPS 測定、TEM 観察および TDS 測定から炭素照射温度変化が及ぼすタングステン炭素混合層の化学状態、表面構造および重水素滞留挙動への影響を検討し、炭素照射タングステン中の欠陥形成および水素同位体滞留とタングステン炭素混合層形成との相関を明らかにした。

### 【実験】

本研究にはアライドマテリアル社製、1173 K 歪み取り処理済みの多結晶タングステンを使用した。試料を  $3 \text{ mm}^{\phi} \times 0.1 \text{ mm}^{\text{t}}$  に加工した後、静岡大学にて重水素をエネルギー  $3 \text{ keV D}_2^+$ 、フラックス  $1.0 \times 10^{18} \text{ D}^+ \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 、フルエンス  $1.0 \times 10^{23} \text{ D}^+ \text{ m}^{-2}$  の条件で照射した。また炭素イオン照射に関しては、照射時の試料温度を室温、673 K と変化させて、イオンエネルギーを  $10 \text{ keV C}^+$ 、イオンフラックスを  $1.0 \times 10^{17} \text{ C}^+ \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 、イオンフルエンスを  $1.0 \times 10^{21} \text{ C}^+ \text{ m}^{-2}$  として照射を行った。各イオン照射後、九州大学の透過型電子顕微鏡(TEM)を用いて 1073 K での焼鈍前後における試料中の照射損傷を観察した。

また静岡大学にて、同条件で重水素単独照射および炭素照射後重水素照射した W に昇温脱離法(TDS)による測定を、昇温速度  $30 \text{ K/min}$ 、昇温領域 R.T - 1173 K にて行い重水素の放出挙動を測定した。加えて、炭素照射タングステンの表面化学状態および深さ方向における化学状態を X 線光電子分光法(XPS)にて測定した。各試料中の重水素深さ方向分布は富山大学にてグロー放電発光分光分析(GD-OES)により測定した。

### 【結果および考察】

図 1 にフルエンス  $1.0 \times 10^{23} \text{ D}^+ \text{ m}^{-2}$  照射した W 試料の TDS スペクトルを、これまでに行った  $1.0 \times 10^{22} \text{ D}^+ \text{ m}^{-2}$  照射時の結果と比較したものを示す。 $1.0 \times 10^{23} \text{ D}^+ \text{ m}^{-2}$  照射試料では、400、520、600、700 K に 4 つの重水素放出ピークが見られた。低温側の 400 K と 520 K の放出はそれぞれ表面吸着および転位ループ<sup>[1]</sup>と原子空孔<sup>[2]</sup>に捕捉された重水素の脱離と帰属した。一方、高温側の脱離ピーク(600 K および 700 K)は、重水素放出量に顕著な増加が見られた。これは重水素照射量増加による新たな捕捉サイトの形成および重水素のバルクへの拡散によるものと考えられた。図 2 に、フルエンス  $1.0 \times 10^{23} \text{ D}^+ \text{ m}^{-2}$  にて重水素照射した試料の焼鈍後における TEM 観察像を示す。焼鈍によりボイドの集合が観察されたため、照射時にナノボイドが形成していたことが示唆された。また、富山大学にて行った GD-OES の結果より、重水素高フルエンス照射時にはバルク領域での重水素滞留量が増加した。これらの結果および酸素に捕捉された重水素の脱離温度領域に関する報告から、ピーク

3 およびピーク 4 はそれぞれボイドに捕捉された重水素の脱離およびバルク方向へ拡散し結晶粒界に存在する

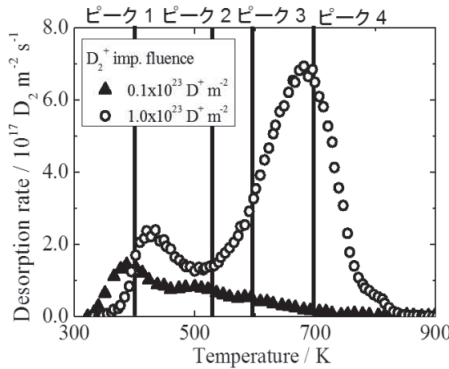


図1 各フルエンスにて重水素照射した W に対するTDSスペクトル

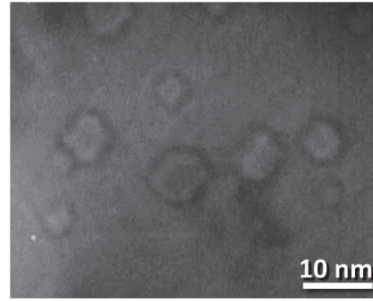


図2  $1.0 \times 10^{23} \text{D}^+ \text{m}^{-2}$ 照射したWに対する焼鈍後のTEM観察像

酸素に捕捉された重水素の脱離と帰属しされた。

図3 に室温および 673 K で炭素照射した試料における焼鈍後の TEM 像を示す。どちらの試料においてもボイドの形成が確認されたが、焼鈍後のボイドの大きさは室温照射試料が 5 nm 以下であるのに対し 673 K での照射試料は約 10 nm であった。また、静岡大学にて行った XPS 測定より、室温照射時と比較し 673 K 照射試料では表面炭素量が減少することがわかった。これらの結果より、室温での炭素照射時では 673 K での照射と比較し、照射により形成した原子空孔が炭素により占有されている割合が高いことが示された。図4 に各温度で炭素照射した後、重水素を  $1.0 \times 10^{22} \text{D}^+ \text{m}^{-2}$  照射した試料の TDS 結果を示す。炭素照射試料においてピーク

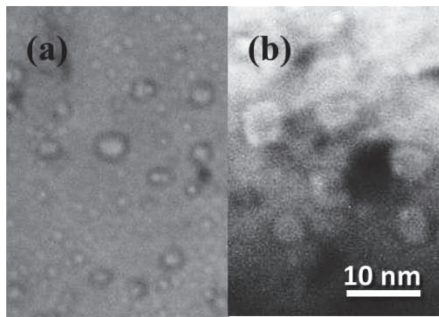


図3 各温度で炭素照射したタングステンの TEM像 (a)室温 (b)673 K

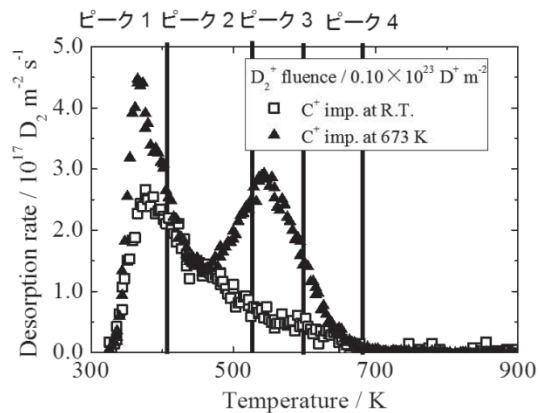


図4 各温度で炭素前照射したタングステンにおけるTDSスペクトル

1、ピーク 2、ピーク 3 としての重水素放出ピークが見られた。ボイドの形成はどちらの試料でも観察されたが、欠陥における重水素滞留量は 673 K で照射した試料の方が大きい。これは、原子空孔やボイドを占有していた炭素が加熱により減少し、各捕捉サイトにおける重水素滞留能が増加したことが原因と考えた。

本研究により、照射した炭素が欠陥に捕捉されることにより欠陥の集合および重水素滞留挙動に影響を及ぼすことが明らかとなった。

[1] H. Eleveld *et al.*, *J. Nucl. Mater.* **191** (1992) 433

[2] O.V. Ogorodnikova *et al.*, *J. Nucl. Mater.* **415** (2010) 661

## 1. 研究目的

プラズマ対向壁の表面状態は、照射損傷、再堆積、He バブル形成等の様々なプラズマ・壁相互作用 (PWI) 現象に起因して変化する。この表面改質が壁の水素吸蔵・放出特性に与える影響の理解は、核融合炉のトリチウムインベントリやプラズマの粒子制御に関連して重要である。本研究では、低損耗・高融点という特長から国際熱核融合実験炉 ITER においてプラズマ対向材料としての使用が計画されているタングステン材料に注目し、小型の直線型プラズマ生成装置を用いた低エネルギー・高フラックスプラズマのタングステンへの照射及びタンデムミラー型装置 GAMMA10 を用いた高イオン温度プラズマのタングステンへの照射実験を行い、極限環境下におけるタングステン中の水素吸蔵、材料損傷に関する基礎過程の理解を深めることを目的としている。

## 2. 実験結果及び考察

### 2.1 低エネルギー・高フラックスプラズマ照射実験

今回の実験では、2種類のタングステン (アライドマテリアル社製) を用いた。サンプルのサイズは、 $\phi$  10mm x t1mm である。ひとつはロッド状に成形されたタングステンをカットしたものであり、もう一方は板状に成形されたタングステン板をカットしたものである。これら2つのサンプルの断面写真を図1に示す。タングステン粒の伸びの方向がプラズマ照射面に対して、垂直方向 (垂直サンプル: 図1(a)) と平行方向 (平行サンプル: 図1(b)) に伸びていることが分かる。粒のサイズは、垂直サンプルで  $10 \times 2 \mu\text{m}$ 、平行サンプルで  $5 \times 2 \mu\text{m}$  である。2つのサンプルの純度は99.99%である。サンプルは鏡面研磨後、アセトン、エタノールにて超音波洗浄され、1173K、 $1 \times 10^{-6}$  torr で1時間焼鈍された。焼鈍後のサンプルは、小型PWI模擬実験装置 APSEDASにて低エネルギー・高フラックスプラズマに照射された。サンプルへの入射フラックスは  $3 \times 10^{21}$  D/m<sup>2</sup>sec であり、入射エネルギーは20-30eVである。プラズマ照射後にサンプルをTDS装置に移し、300Kから1470Kまで1K/sの昇温速度で加熱してTDSスペクトルと重水素吸蔵量を測定した。

図2に垂直サンプルと平行サンプルの重水素リテンションの照射温度 (サンプルの表面温度) 依存性を示す。いずれの照射温度でも、垂直サンプルのリテンションの方が平行サンプルよりも高くなっていることが分かる。また、両サンプルともに照射温度が550K付近で最大値をとっている。垂直サンプルのリテンションが高い理由としては、垂直サンプルの材料深さ方向への実効的な水素拡散係数が平行サンプルに比べて高いためであると考えられる。

### 2.2 高イオン温度プラズマ照射実験

水素リサイクリングの理解のためには、PWIに起因する壁の微視的状态変化の把握が重要となる。今回の実験では、W板及び透過型電子顕微鏡 (TEM) 観察用のステンレス (SS) 薄膜とタングステ

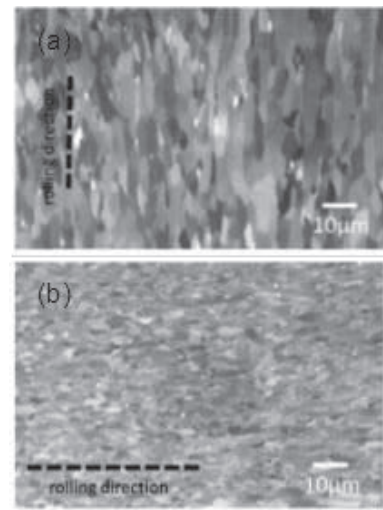


図1 (a)ロッド状に成形されたタングステン (垂直サンプル) と板状に成形されたタングステン (平行サンプル) の断面 SEM 画像。プラズマ照射面は横方向。

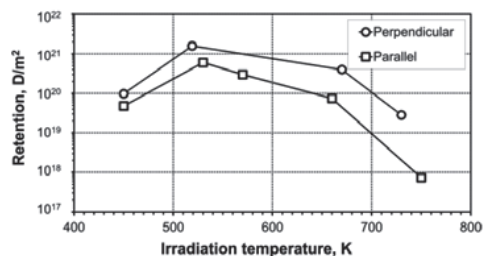


図2 垂直サンプル (○) と平行サンプル (□) の重水素リテンションの照射表面温度依存性。

ン(W)薄膜を用いて、GAMMA10のセントラル部のプラズマを照射した。照射時間及び照射時期による損傷、堆積の依存性を調べるために照射日数を1日、12日、49日(全実験期間)と変えて実験を行った。それぞれの照射実験での総照射時間は1日照射で約9秒、12日照射で約80秒、全実験期間の照射では約370秒である。1日照射実験時はイオンサイクロトロン周波数帯加熱(ICRF)のみでプラズマ生成・維持し、12日照射実験時はICRFに加え、プラグ・バリア部に短時間の電子サイクロトロン加熱(ECH)を行っている。この2回の照射実験はGAMMA10セントラル部に今回新たに設置した表面プローブシステムを用いて行った。全実験期間を通じての照射は、GAMMA10真空容器内に2箇所設置した長期設置試料を用いた。

図1に長期設置試料のW薄膜のTEM観察結果を示す。試料内部に微細な転位ループが形成されていることが分かる。長期設置試料は、GAMMA10セントラル部の軸方向中央(センター部)と中央から軸方向東側に1.2m離れた位置(イースト部)に設置されており、中央から離れた試料では転位ループ形成が少なくなっていることが分かる。この損傷はプラズマからの荷電交換中性粒子に起因している。セントラル部のプラズマのイオン温度は数keVであり、図3に示す転位ループ形成量の違いはセントラル部のイオン温度と密度の軸方向分布を反映していると考えられる。また、試料の断面観察から評価した堆積層の厚さは、センター部の試料では約8nm、イースト部の試料では約1.8nmであった。センター部試料の堆積層は、ナノ結晶の集合体であり、回折リングから鉄の酸化層であることが分かった。

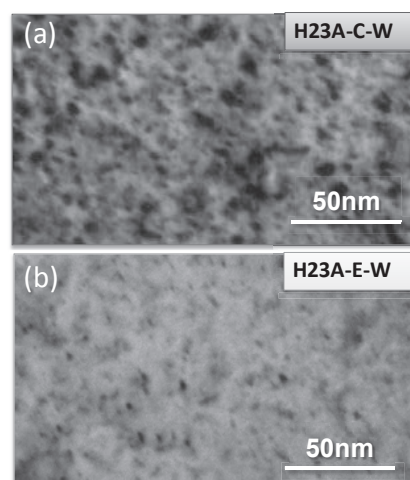


図3 GAMMA 10の(a)セントラルセル中央部と(b)軸方向へ1.2m離れた位置に長期設置されたタングステンサンプルのTEM観測結果。

### 3. 研究成果報告

- (1) 坂本瑞樹、吉田直亮 他、「GAMMA10における長期設置試料と表面プローブを用いたプラズマ・壁相互作用研究」、プラズマ・核融合学会第29回年会、2012年11月27日～30日、クローバープラザ(福岡県)27E38P.
- (2) A. Rusinov, M. Sakamoto et al., “Deuterium retention in various kinds of tungsten irradiated by low energy and high flux plasma in APSEDAS”, Joint Conference of OS2012 and PMIF2012, August 27-31, 2012 (Tsukuba) O/PMIF-21.

### 4. 研究組織

氏名	所属	役割・研究分担
坂本 瑞樹	筑波大学・数理物質系	研究統括(代表者)
赤羽 泰央	筑波大学・数理物質科学研究科	プラズマ照射実験・解析
芦川 直子	核融合科学研究所	ダスト解析
時谷 政行	核融合科学研究所	材料解析
大野 哲靖	名古屋大学・工学研究科	ダスト挙動
剣持 貴弘	同志社大学・生命医科学部	ACAT-DIFFUSE解析
宮本 光貴	島根大学・総理工	水素吸蔵解析
吉田 直亮	九州大学・応力研	材料解析
渡辺 英雄	九州大学・応力研	材料解析
徳永 和俊	九州大学・応力研	材料解析
ルシフ アレクサンドル	九州大学・総理工	プラズマ照射実験・解析

## 耐熱構造機器の接合界面特性に及ぼす照射後熱処理の影響

茨城大学工学部 車田 亮

## 1. 研究目的

耐熱構造機器は、アーマ材とヒートシンク材との接合構造を有し、高性能化のために、アーマ材料には耐熱性・耐熱衝撃性に優れ、高い高温強度や熱伝導性を有することが望まれ、ヒートシンク材料には強制冷却のための高熱伝達性を有するとともに、それらの接合技術の確立などが要求されている。一方、最近開発された無欠陥接合法 (NDB ; Non Defective Bonding) による耐熱構造機器の製作は、従来の熱応力緩和のための中間材 (Mo, Ni など) を挿入する必要がなく、その接合界面強度や熱伝達特性が著しく改善され、高性能を有する耐熱構造機器の簡単な製作が可能となっている。ただし、その接合界面の健全性や実用寿命の延長に関する研究が不十分であると言える。そこで、本研究は、今までの九大応力研との共同研究の実績を踏まえて、特に、NDB 法による耐熱構造機器の接合界面に注目し、その健全性および実用寿命の延長を目指して、接合界面の微細組織と機械的特性に及ぼす照射後熱処理の影響を究明することを目的とする。

## 2. 実験方法

本研究では、まず、タングステン (W) と無酸素銅 (OFC) を直接接合した NDB (Non Defective Bonding) 接合材料を制作する。タングステン材料は、日本タングステン(株)製の純度 99.95 [%] の微細結晶粒純タングステン (JT-01W) および純度 99.99 [%] の粗大結晶粒純タングステン (JT-02W) を使用し、銅材料は、酸素量が 3ppm 以下と高純度材である OFC を使用する。

次いで、タングステンと銅との接合材料に、九州大学応用力学研究所の高エネルギーイオン発生装置を用いて、2.4MeV の銅イオン ( $\text{Cu}^{2+}$ ) を、573[K]において高温照射する。高温照射では、低照射損傷 LI (1.8dpa in Cu, 1.0dpa in W)、重照射損傷 HI (18dpa in Cu, 10dpa in W) を実施する。

その後、超微小硬さ試験及び3点曲げ試験による機械的特性評価およびSEMによる微細組織観察を実施する。本研究におけるダイナミック硬さは、 $D_h = \alpha L/h^2$  で示される。ここで  $\alpha$  は三角錐圧子の定数 ( $\alpha = 3.8584$ )、L は試験荷重、h は押し込み深さである。

また、曲げ強度はまた、曲げ強度は、 $\sigma_{b3} = 3PL/2wt^2$  で示される。ここで、P は試験荷重、L は外スパンの距離、w は試験片の幅、t は試験片の高さである。

最後に、イオン照射試験前後の機械的性質と微細組織の変化を測定した後、真空電気炉を用いて、673[K]において100[min]保持の熱処理 (HT) を行い、材料特性のアニーリング効果を究明し、実用寿命の延長について考察する。

## 3. 実験結果及び考察

Table 1 は、JT-01W/OFC と JT-02W/OFC について、照射後高温熱処理によるダイナミック硬さの変化率を示す。また、Fig. 1 は、照射後高温熱処理による曲げ強度の変化を示す。

Table 1 において、タングステンは軽照射で平均 1.05 倍、重照射で平均 1.09 倍の照射硬化を示した後、照射後高温熱処理により、タングステン部分では軽照射後熱処理で平均 0.95 倍、重照射後熱処理で平均 0.96 倍の硬さを示し、照射硬化の回復が確認できた。一方、銅部分では、再結晶温度 (473K) を超えた高温照射では、熱による影響が大きく、再結晶や粒成長を生じ軟化した後、照射後熱処理によりさらに大きく軟化した。

Fig. 1 において、軽照射では、JT-01W/OFC で 1.22 倍、JT-02W/OFC で 2.56 倍の曲げ強度の増大を示し、重照射では、JT-01W/OFC で 1.36 倍、JT-02W/OFC で 1.33 倍の曲げ強度の増大を示し、照射効果による曲げ強度の増大が確認できた。また、軽照射後熱処理では、JT-01W/OFC で照射材の 0.77 倍、JT-02W/OFC で照射材の 0.82 倍の曲げ強度を示し、重照射後熱処理では、JT-01W/OFC で照射材の 1.11 倍、JT-02W/OFC では照射材の 0.48 倍の曲げ強度を示した。照射後高温熱処理による曲げ強度の低下傾向が確認できた。さらに、微細組織を有する JT-01W/OFC の方が、高温照射や照射後熱処理による曲げ強度の変化率が小さく、耐熱構造機器の材料に適していると考えられた。

Table 1 Dynamic hardness of heat treated joint materials after irradiation.

Heat treated joint specimen	Condition	W		OFC	
		Outside 0-1[mm]	Inside 1-2[mm]	Inside 2-3[mm]	Outside 3-4[mm]
JT-01W/OFC	Unirradiation [ $D_h$ ]	1867	1938	239	188
	LI at R.T	×0.95	×1.01	×0.80	×0.60
	HI at R.T	×1.05	×1.01	×0.77	×0.65
	LI at 573K	×0.94	×0.92	×0.57	×0.58
	HI at 573K	×0.98	×0.99	×0.54	×0.51
JT-02W/OFC	Unirradiation [ $D_h$ ]	1827	1834	203	201
	LI at R.T	×1.20	×1.05	×0.70	×0.70
	HI at R.T	×1.11	×1.19	×0.74	×0.71
	LI at 573K	×0.98	×0.95	×0.75	×0.80
	HI at 573K	×0.91	×0.95	×0.64	×0.66

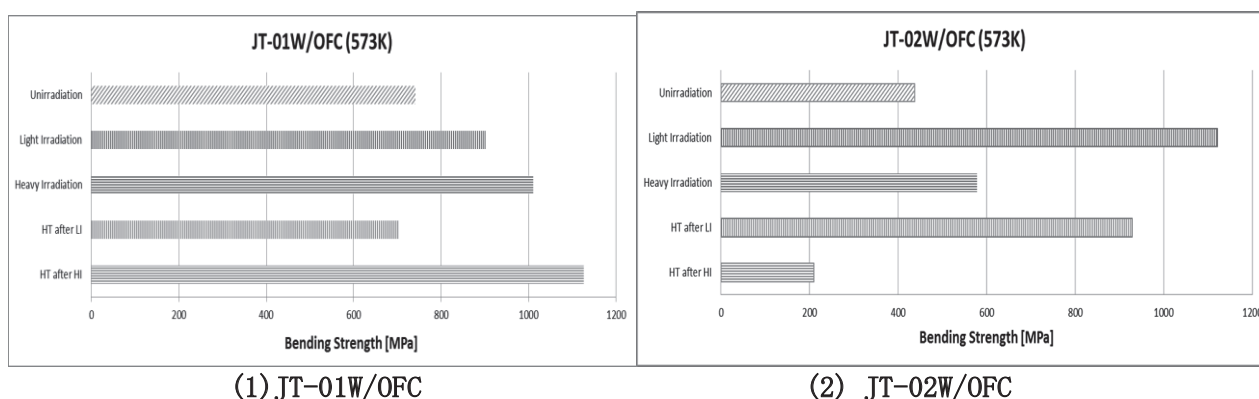


Fig.1 Bending strength of heat treated joint materials after irradiation.

#### 4. まとめ

本研究は、高性能を有する耐熱構造機器の開発を目的に、タングステンと銅との接合界面の機械的性質に及ぼす照射後熱処理の影響を究明した。得られた結果を以下に要約して示す。

- (1) 高温照射後の硬さ試験により、タングステンは照射硬化が確認できたが、銅は熱の影響が大きく軟化した。また、照射後高温熱処理で、タングステン部分は硬さが回復したが、銅部分は照射温度と熱処理の影響により大きく軟化した。
- (2) 高温照射後の3点曲げ試験により、JT-01W/OFCとJT-02W/OFCの接合強度の増大が確認できた。照射後高温熱処理により、接合強度の低下が確認できた。その変化率を比較すると、微細組織を有するJT-01W/OFCは、高温照射や照射後熱処理による変化率が小さく、耐熱構造機器の材料に適していると考えられた。

#### 5. 研究組織

茨城大学工学部：車田 亮 大学院生：小吹隆之、由比藤峻佑  
九州大学応用力学研究所：渡邊英雄

#### 6. 研究成果報告

- 1) 小吹隆之、車田 亮、他、日本機械学会関東支部第20回茨城講演会講演論文集、茨城大学、(2012. 8. 24), pp. 163-166.
- 2) 小吹、車田、他、日本銅学会第52回講演大会講演概要集、東京工業大学、(2012. 11. 3-4), p. 85-86.
- 3) 車田 亮、小吹隆之、伊藤吾朗、渡邊英雄、松尾 明、銅とタングステンの接合界面強度に及ぼすイオン照射後熱処理の影響、銅と銅合金、第51巻1号、(2012), pp. 153-157.

## 無欠陥接合により作製されたタングステン/銅接合材料の熱負荷特性

茨城大学工学部 車田 亮

### 1. 目的

タングステン(W)材料は、耐熱性・耐熱衝撃性に優れ、高い高温強度や熱伝導率を有するためITERのダイバータ、原型炉の第一壁及びタイバータのアーマ材料等として使用すること計画されている。今後、実用化を目指すためには、W材料に対する熱負荷特性を究明する必要がある。また、最近、HIP 後、鍛造や圧延等を行わないW材が開発され、この材料は従来の粉末焼結タングステン材と組織が大きく異なり、耐熱負荷特性も異なることが予想される。さらに、無欠陥接合法(NDB : Non Defective Bonding)により、銅との接合方法が開発され、W材と銅の接合強度や熱伝達特性が著しく改善されている。そこで、本研究は、この新しく開発されたW材と無欠陥接合法により作製された銅との接合体について、実際の核融合実験装置において想定される熱負荷を与え、耐熱負荷特性を評価することを目的とする。

### 2. 実験方法

#### (1) 試料製作

NDB 法はタングステン合金と銅との接合方法として開発された接合技術で、ろう材を使用しない直接接合方法である。この接合の理論的な接合メカニズムは充分には解明されていないが、Cu と W が機械的に接している段階、Cu の溶解により W との接触面積が増加する段階、Cu と W との原子間距離がさらに近くなり合金が形成される段階、その後、Cu が冷却され凝固する段階を経て接合体が作製されるものと考えられる。

本研究では、10mm x 10mm x 5mm の超微細結晶粒 W 材と 10mm x 10mm x 5mm の Cu の接合体を NDB 法により作製した。使用した超微細結晶粒 W 材は、HIP 法により作製されたもので、その後、鍛造圧延等されておらず、通常の粉末焼結 W 材とは、性質も異なることが予想される。図1に NDB 法により作製した W/Cu 接合体の写真を示した。熱負荷実験の際の界面の許容温度は接合温度の 1/3 程度と考えられる。また、Cu 部分の使用可能な温度は純銅で 200°C 程度から再結晶するため、それ以下にする必要があると考えられる。従って、W 表面で 1500-1600°C、界面で 300-400°C、Cu 部分で 200°C 以下が使用温度と考えられる。

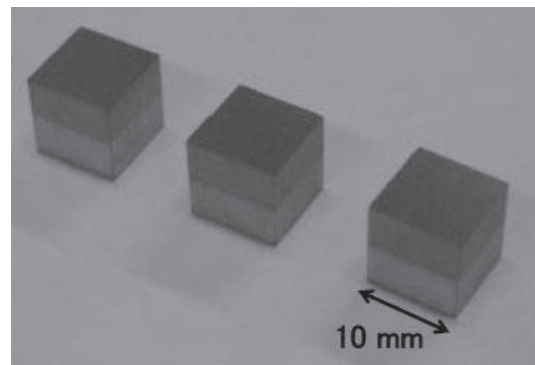


図1 NDB法により作製したW/Cu接合体

#### (2) 熱負荷実験

熱負荷実験は、九州大学応用力学研究所の電子ビーム熱負荷実験装置を用いた。接合体はCu製の試料台に5mmφの孔が開いたW製の押さえ板で機械的に固定した。この接合体を試料台に固定した写真を図2に示す。接合体には、Cu部側面の接合界面から2mm下の位置に、直径1mmφで深さ4mmの孔を開け、この孔に図2に見られるようにシースタイプの熱電対を装着し、これにより銅部分の温度測定を行った。また、試料台内部の冷却管に水を流し、強制水冷却を行っている。接合体のW表面温度は、低温用及び高温用の2台の二色放射温度計を使用し、ビーム照射部の温度を測定した。この二色放射温度計は、2つの波長における放射エネルギーを計測し、比率から温度を測定するた

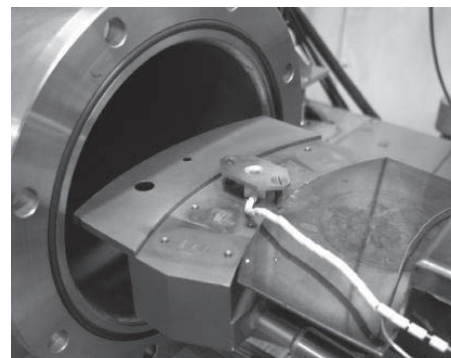


図2 試料台に装着した接合体

め、単色放射温度計より正確に温度測定を行うことができる。

電子ビームの加速電圧は 20kV でビームサイズは約 3mm である。また、試料に 100V の電圧を印加し、電子ビーム照射により発生する 2 次電子や熱電子の放出を抑えた状態で試料電流を測定し、これにより熱流束を求めた。熱負荷実験は、2 s のビーム照射を行い、その後、30 s の休止期間をおき、1 サイクル 35 s の繰り返しを 5 回行った。この際、2 s の電子ビーム照射は、一定の熱流束で、12 MW/m<sup>2</sup>、24 MW/m<sup>2</sup>、37 MW/m<sup>2</sup>、42 MW/m<sup>2</sup> 及び 59 MW/m<sup>2</sup> の 5 つの異なる値について実験を行った。

### 3. 実験結果及び考察

図 3 には、熱流束が 59 MW/m<sup>2</sup> の場合の試料電流、熱電対の温度の時間変化を示した。照射を開始すると共に、試料電流が流れ終了と共に、試料電流が OFF となっていることがわかる。表面温度は、放射温度計の測定下限温度である 450°C には至っていない。一方、Cu 部分の温度は、照射開始後、上昇し、定常状態に達する前に照射終了と共に下降していることがわかる。5 回の照射においてもその温度変化は変わらず、加熱により界面部分の剥離等の損傷は発生していないことがわかる。図 4 には、熱流束を変化させたときの Cu 部分の最高温度を示した。熱流束が増加するに従いほぼ直線的に最高温度は増加することがわかる。熱流束が、59 MW/m<sup>2</sup> の場合、Cu の測定部の温度は最高 174°C となっているが、繰り返し照射による温度変化には変化はなく、剥離等の損傷による温度変化への影響はないことがわかった。

### 4. モックアップ接合試験体の作製

上記のように NDB 法により作製した W/Cu 接合体の熱負荷特性を評価した。さらに、試料の大型化及び強制冷却状態における熱負荷及び熱疲労特性を評価するために、冷却管付のモックアップ接合試験体を作製した。この際、大型化による熱応力の増加を低下させるために、W 部分を 19.5 mm x 5mm x 5mm の 4 つの部分に分割し、冷却管付の OFHC に NDB 接合を行った。また、W 材については、超微細結晶粒 W 材に加え、粗大結晶粒 W 材についても接合を行い、2 種類の異なる W 材について NDB 接合を試みた。このモックアップ接合体の写真を図 5 に示した。接合中及び接合後に亀裂、剥離など発生せず、良好な接合が実施できた。

### 5. 研究成果発表

K. Tokunaga, T. Hotta, K. Araki, Y. Miyamoto, T. Fujiwara, M. Hasegawa, K. Nakamura, A. Kurumada, M. Tokitani, S. Masuzaki, K. Ezato, S. Suzuki, M. Enoeda, M. Akiba, Thermomechanical behavior of plasma spray tungsten coated reduced-activation ferritic/martensitic steel, 27<sup>th</sup> Symposium on Fusion Technology (SOFT 2012), September 24-28, 2012, Belgium

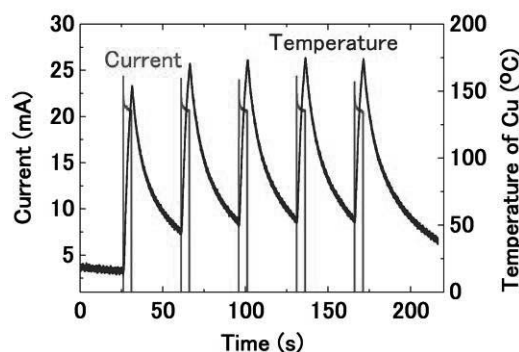


図 3 試料電流と Cu 部温度の時間変化

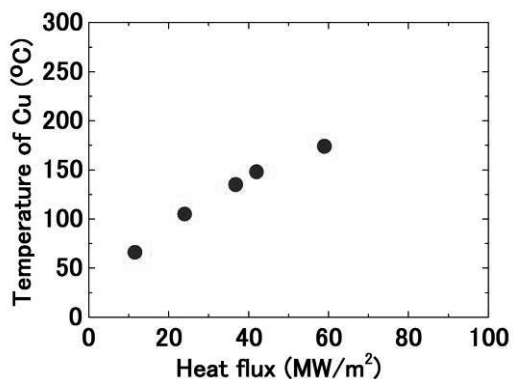


図 4 Cu 部温度の熱流束依存性

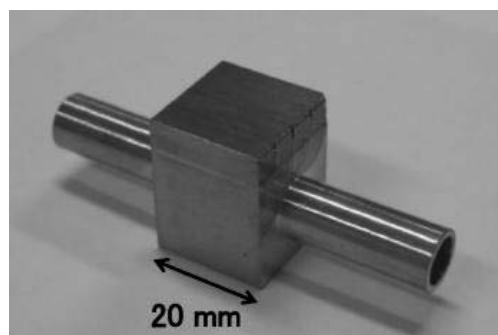


図 5 NDB 法により作製された冷却管付 W/Cu モックアップ接合試験体

## ゾンプレートを使った QUEST プラズマ計測

電気通信大学 竹田辰興

**【目的】** 磁気閉じ込めプラズマの実験的研究においては電磁波計測が有効で、中でも可視光を中心とする画像計測は重要である。本研究はゾンプレートによるプラズマ画像計測法の開発を目的とする。

**【研究概要】** ゾンプレートによる画像において特徴的なことは「背景光」と波長依存性がガラスレンズと逆向きの「大きな色収差」の存在である。大きな色収差の存在は、場合によっては、積極的に利用する可能性があり、我々も検討課題とした。しかし、背景光は画像のコントラストを弱めて分解能を低下させるので除去することが望ましい。ゾンプレートによる画像は、一般に、1次の回折光によって作られるが、1次以外の回折光は背景光としてダイナミックレンジを狭くする（コントラストを弱くする）働きを持つ。これら1次以外の回折光の内0次の回折光（非回折光、直進光）は特に大きくて、フレネル型ゾンプレートの場合、1次の回折光の $\pi^2/4$ 倍に達する。ゾンプレートによる画像の内1次回折光による部分はゾーン数を増やすことによって、より鮮明になるが、この背景光の存在のために画像全体は極めて不鮮明なものとなる。ここでは、背景光の効果を取り除いて、より鮮明な画像を得る方法について研究すると共にゾンプレートの磁気閉じ込めプラズマ画像解析への利用について検討をした。

**背景光の除去** 上の記述からわかるように、1次以外の回折光を除去することによって背景光を取り除くことができる。特に、0次の回折光（直進光）を取り除くことによって背景光の影響を大幅に減らすことが可能である。このためには、たとえば、次のような方法が考えられる。第一には、ゾンプレートを出た光のうち1次回折光が収束する位置に凸レンズを置いてそこに平行光線として到達した0次回折光を収束させ、そこにマスクを置き0次回折光を遮断する。一方、収束点を過ぎて広がった1次回折光は色消しレンズ系で収束させて目的を達成する。このシステムは、L. Koehlin, et al. により衛星搭載望遠鏡のプロトタイプ（焦点距離：約18m、ゾーン数：696）として成功したことが報告されている [1]。しかし、この方法は、短焦点の系に応用することは困難と思われる。第2の方法としては、背景光は0次回折光だけに因るものとして0次回折光による画像は同じ半径のピンホール画像と同じであると考えてゾンプレート画像からピンホール画像の定数倍を差し引き1次回折光の画像だけを撮り出すというアイデアがある。ゾーン数が $2n+1$ であるような正のゾンプレートの場合、入射した光の内、 $n/(2n+1) \sim 1/2$  が透明ゾーンの位置に入射する。このことを考慮すれば、同じ被写体を、ゾンプレートと、（そのゾンプレートと同じ半径の）ピンホールによって撮影（これらを「像A」および「像B」とする）して、ピクセルごとに、「像A-k\*像B」（ $k \sim 0.5$ ）の演算をすることにより、背景光はほぼ除去される。この演算は、PixelMath [2] や imageJ の PlugIn [3]

を使って容易に行える。焦点距離 200 mm、ゾーン数 29 のフレネルゾーンプレートを用いて、この操作を行った例を図 1～3 に示す。図 1 および図 2 がそれぞれ、像 A および像 B を示しており、図 3 が「像 A - (1/2) \* 像 B」である。図 3 は背景光がかなり除去されて、図 1 に比べて鮮明になっているが必ずしも十分ではない。これは、ゾーン数が少ないことも原因の一つであるが、この実験は背景光除去のアイデアを簡単な装置で検証することであったので工作精度が著しく悪いためと考えられる。また、この方法では、同じ時点に同じ位置から 2 枚の写真を撮らなければならないので、たとえば、ハーフミラーを使って光を分割するなどの必要性もあるので実際の実験での利用には多くの課題をクリアする必要がある。

**プラズマ画像解析への適用性** ゾーンプレートによる点光源の像の解像度自体はゾーン数を多くすることによって大きくすることができ、何らかの方法で背景光を取り除けば、解像度の高い写真が得られる。光学素子としての ZP の特徴は、①ガラスレンズと違い光線が通る経路を真空にできるし 1 枚の薄い板状材料から作られるので大きな ZP は対応するガラスレンズに比べて極端に軽い、②焦点距離が光の波長に逆比例するのでガラスレンズに比べて分散がきわめて大きな素子ができる、③ゾーン数を増やすと解像度が増加し、焦点深度、被写界深度が浅くなる、ということである。このうち、①の特徴は、いろいろな分野で有効利用されつつある。②の特徴に関しては、分散の向きが通常のガラスと逆であることを利用した超高性能色消しレンズが可視光分野での利用例の一つである。プラズマ計測に関しては①の特徴の利用が今後期待される他、なるべく浅い被写界深度の光学系を実現して、プラズマの H $\alpha$  線による単色光像を撮影することが期待できる。しかし、現時点では磁気閉じ込めプラズマの可視光計測におけるゾーンプレートのガラスレンズに対する優位性は明確とは言えない。

#### 参考文献

- [1] L. Koechlin, et al., First high dynamic range and high resolution images of the sky obtained with a diffractive Fresnel array telescope, *Experimental Astronomy* (2012) 33, p.129.
- [2] S.L. Tanimoto, *An Interdisciplinary Introduction to Image Processing*, 2012, The MIT Press, <http://pixels.cs.washington.edu/PixelMath/pmdownload/request.php>,
- [3] <http://rsbweb.nih.gov/ij/>, <http://rsbweb.nih.gov/ij/plugins/calculator-plus.html>



図 1

図 2

図 3

## 磁場閉じ込めプラズマ中の多スケール・多プロセス現象の

## 理論・シミュレーション研究

日本原子力研究開発機構 石井康友

## 目的

磁場閉じ込めプラズマにおいては、時間尺度及び空間尺度の異なる諸現象（MHD、微視的乱流等）が定性的に異なる空間領域に跨って相互作用し、その結果として核融合炉の特性が決まる。それを総合的に理解し、予測・制御するためには、外部情報入力を伴う、輸送、MHD、乱流、高エネルギー粒子の相互作用を考慮したグローバルシミュレーションが必要であると認識されつつある。

本研究では（１）プラズマ周辺における非線形 MHD 現象およびそれとコアプラズマとの相互作用（２）核融合炉における MHD 不安定性の飽和・抑制や突發現象を解明するための理論・シミュレーションモデル及び（３）高エネルギー粒子と MHD 現象の相互作用を記述する理論・シミュレーションモデルを改良・開発し、核融合炉の MHD 特性の総合的な解析を可能にするとともに、核燃焼プラズマの統合シミュレーションを実現する上で必要なモデルを提供することを目指す。

## 研究成果

プラズマの安定性にとって重要なプラズマ回転が抵抗性壁モード（RWM）に与える影響を、日本原子力研究開発機構で開発した MINERVA/RWMAc コードを用いて調べた（N.Aiba, J.Shiraishi）。正磁気シア配位における RWM に対しては、プラズマ回転に伴う遠心力により MHD 平衡が変化し、RWM の成長率が減少する事を明らかにした（J.Shiraishi, IAEA2012）。また、負磁気シアプラズマに於いては、プラズマ回転は RWM の安定化のみでなく不安定化を引き起こす可能性が有る事を明らかにした（N.Aiba, accepted to PPCF）。プラズマ回転によるこのような再不安定化は、RWM と安定な MHD モードとの相互作用により引き起こされている可能性が有る。回転により再不安定化した RWM では、静止プラズマにおける RWM に比べて、プラズマ中心領域においても高振幅のモード構造を持っている。

核燃焼プラズマで重要となる高エネルギー粒子駆動モードに関するシミュレーション研究を行った（A.Bierwage, Y.TODO）。今年度は、プラズマの最外殻磁気面の外を通過してプラズマ中に戻る軌道を持つ粒子の影響を考慮した AE 安定性解析を行った。MEGA コード(NIFS)と粒子軌道追跡コード OFMC(JAEA)を連動させたシミ

ミュレーションにより、異なるタイムスケール（波—粒子相互作用 $\sim 10\text{ms}$ 、バンプオンテイル $\sim 10\text{ms}$ 、減速時間 $\sim 1\text{s}$ ）の物理によって決定される位相空間の構造形成の数値解析を行った（A.Bierwage IAEA2012）。

プラズマ中の突発現象に関しては、電子慣性効果を含む拡張型 MHD モデルに於いて変分原理を定式化し、 $m=1$  内部キンクティアリングモードの爆発的成長を解析的手法に予測する事に成功した（M.Hirota submitted to NF）。トカマクプラズマで観測される鋸歯状振動現象は、炉心プラズマの高性能化に於いて重要な制御対象の現象である。この鋸歯状現象は  $m=1$  内部キンクティアリングモードに起因すると考えられているが、その速い成長率を引き起こす物理的機構はまだ解明されていない。速い成長率を再現するために、電子慣性効果による無衝突磁気再結合がその原因と考えられている。しかしながら、従来 of 解析的手法である漸近接続法は線形領域しか取り扱えず、非線形発展を解析的に取り扱う事は不可能であった。また、電子流体効果が重要となる内部領域と、理想MHDで記述できる外部領域における時間・空間スケールの差により、直接的な非線形シミュレーションも多く of 計算資源を必要とし、高性能トカマクプラズマのパラメータ領域でのシミュレーションは依然として困難である。本研究では、無衝突プラズマが散逸を持たない保存系であることに着目し、2流体モデルへの変分原理の拡張と変分原理を用いた非摂動論的な解析手法により、鋸歯状振動における爆発的成長の理論解析に成功した。

## 酸化物・窒化物結晶における照射欠陥形成およびその安定性

九大工、安田 和弘, 高木 聖也(院), 山本知一, 松村 晶

## 1. 目的

蛍石型酸化物セラミックスは、優れた耐放射線照射損傷性を示すことが多くの研究により報告されている。そのため、イットリア安定化立方晶ジルコニア( $Y_2O_3-ZrO_2$ )、セリア( $CeO_2$ )および類似の結晶構造を有するパイロクロア酸化物は、長寿命核種核変換や放射性廃棄物処理のための不活性母相の候補材料となっている。

蛍石型酸化物セラミックスは、金属イオンの質量が酸素イオンに比べて著しく大きく、かつはじき出しエネルギーは金属イオンおよび酸素イオン副格子で異なる値を示し、金属イオン副格子のはじき出しエネルギーは酸素イオン副格子の2倍程度大きい。したがって、放射線照射下における点欠陥形成速度は、酸素イオンの方が著しく大きくなる。例えば、電子照射のように比較的小さい運動エネルギーを格子原子に伝達する照射条件では、酸素イオンにのみ選択的なはじき出し損傷が生じる。さらに、酸素イオン点欠陥の移動度は陽イオンより大きい。以上より、蛍石型酸化物セラミックス中の照射欠陥の形成・成長過程は、酸素イオン点欠陥の挙動に大きく影響を受けることが予想される。実際の核融合炉や原子炉照射環境では、幅広いエネルギースペクトルを持つ一次はじき出しが生成されるため、そのエネルギーに依存して酸素イオン副格子に優先的にはじき出し損傷が誘起されたり、両イオン副格子にはじき出し損傷が誘起される。このような背景に基づいて、核融合炉や原子炉照射環境下での照射欠陥形成・成長過程を明らかにするために、これまで選択的に酸素イオンのはじき出し損傷が誘起される電子照射下において、酸素イオン転位ループの形成・成長過程について調べてきた。本報告では、電子照射により蛍石型構造の $CeO_2$ 中に形成される転位ループの挙動、およびその詳細な構造を電子顕微鏡法にて原子レベルで調べた結果について報告する。

## 2. 実験方法

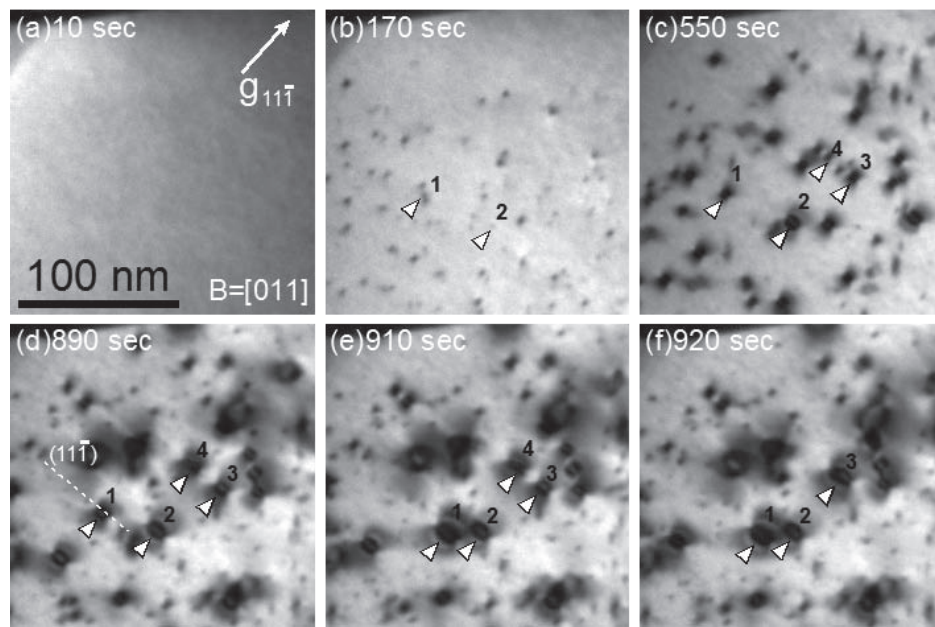
$CeO_2$  焼結体から透過電子顕微鏡用薄膜試料を Ar イオン研磨法により作製した。電子照射下「その場」観察実験は、収差補正器を搭載した高分解能走査透過電子顕微鏡(JEOL JEM ARM200F)および汎用電子顕微鏡(JEOL JEM-2100HC)を用いて行った。電子エネルギーは 80 keV~200 keV, 照射強度は  $1.5 \times 10^{23} \text{ e}^-/\text{m}^2\text{s}$  とした。本研究の電子エネルギーでは Ce イオン副格子にはじき出し損傷は生じず、酸素イオン副格子にのみはじき出し損傷が生じる。高分解能走査透過電子顕微鏡観察には、高角度散乱環状暗視野(HAADF-STEM)法、および環状明視野(ABF-STEM)法を用いた。

## 3. 結果及び考察

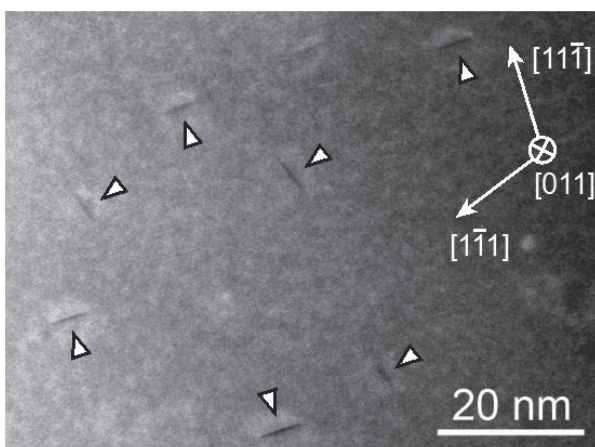
図1は、200 keVの電子照射により形成・成長する転位ループの時間変化を観察した結果を示している。照射温度は 300 K で、照射強度  $1.5 \times 10^{23} \text{ electrons}/\text{m}^2\text{s}$  である。照射開始後 170 秒で黒色のドット状コントラストを呈する 2~3 nm の欠陥集合体(転位ループ)が形成され、照射時間の経過とともに強い歪み場を伴ったダブルアーク型コントラストを呈する転位ループが成長している。図1b-f中に1および2で示した転位ループに着目すると、照射時間の増加に伴って{111}面上を移動しながら成長していた。また、図1c-e中に3および4で示した転位ループは、1および2の転位ループと同様に{111}面上を移動しながら成長し、照射開始後 920 秒で両者が合体する現象が観察された。

図2は、200 keV電子を照射した $CeO_2$ を[011]方向から観察したHAADF-STEM像である。直径約 5 nm

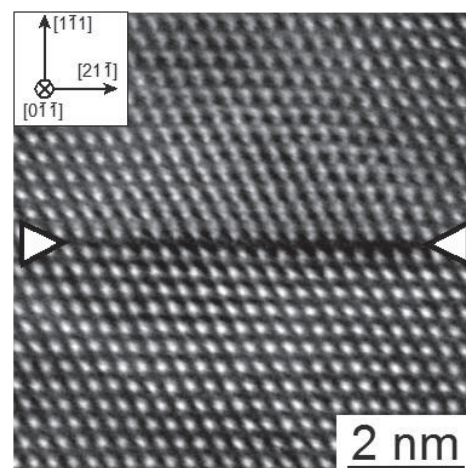
の転位ループ(図 2 中に矢印で例示)が edge-on 条件で形成されており、周辺に強い歪を誘起していることがわかる。この転位ループを同一の方向から高倍率にて HAADF-STEM で観察した $\langle 110 \rangle$ 方向から観察した転位ループを含む領域の HAADF-STEM 像であり、転位ループは edge-on 条件で写真中央に形成している。白く見えるコントラストは、Ce イオン原子列を示している。図 2 より、転位ループには余分な Ce イオン原子列は含まれていないことが分かる。さらに、格子像の解析から、転位ループが存在している箇所の Ce イオン原子間距離は  $4.9\text{\AA}$  であり、(111)面の Ce イオン面間距離 ( $3.5\text{\AA}$ ) に比べて著しく広がっている。このため、転位ループ周辺の Ce イオン配列に大きな格子歪が誘起されている。以上の結果は、低エネルギーの電子照射で形成される転位ループが $\{111\}$ 面に板状に集合した酸素イオンに起因する二次欠陥であるという考察を支持している。



**Figure 1.** Sequential BF images for the nucleation-and-growth process of dislocation loops in  $\text{CeO}_2$  under 200 keV electron irradiation at 300 K with an electron flux of  $1.5 \times 10^{23}$  electrons/ $\text{m}^2\text{s}$ . The micrographs (a)-(f) were taken at an identical region with changing electron irradiation time.



**Figure 2.** HAADF STEM image of dislocation loops in  $\text{CeO}_2$  formed under 200 keV electron illumination during the observation at 300 K, showing dislocation loops on  $\{111\}$  planes at edge-on conditions (indicated by arrows).



**Figure 3.** An example of high resolution HAADF STEM image of a dislocation loop in  $\text{CeO}_2$  irradiated with 200 keV electrons.

## 物理的に無矛盾な渦電流計算機能を備えたプラズマ断面位置形状再構築システム(CCS)のSTプラズマ位置形状制御への適用検討(III)

独立行政法人 日本原子力研究開発機構 栗原研一、川俣陽一、末岡通治、武智 学  
九州東海大学 御手洗 修  
九州大学 薛 二兵、劉 曉龍、浮田天志、中村一男

### 1. 目的

本研究は、九大応力研で平成20年度より既に実験を開始しているプラズマ境界力学実験装置(QUEST: Q-shu University Experiment with Steady-State Spherical Tokamak,  $R=0.68\text{m}$ ,  $a=0.40\text{m}$ ,  $B_t=0.25\text{T}$ , 図1参照)におけるプラズマ断面位置形状の高精度平衡制御系の構築を目指すものである。その手法として、

原子力機構JT-60におけるプラズマ断面位置形状の高精度平衡制御に優れた実績を持つ「コーシー条件面(CCS)法」を用いた実時間プラズマ断面位置形状再構築手法を、QUESTのプラズマ実時間形状制御へ適用させるための検討を行うものである。

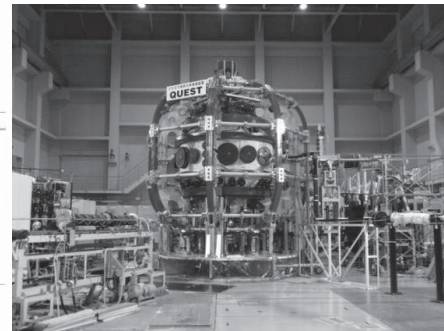
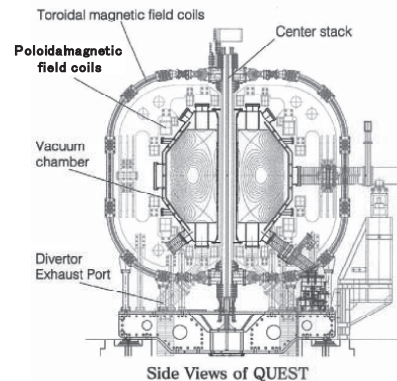


図 1: QUEST

特に、プラズマ変動期の再構築精度に大きな影響を及ぼす真空容器内渦電流の推定法について、物理的に無矛盾なモデルによる実時間計算方法の検討も行う。また昨年度から開始した、センサー種類が増えた場合の精度向上についての検討、並びにQUEST装置での現制御システムとCCS法搭載制御システムの並列同時稼働手法に関して、JT-60で実績のあるメモリ共有方式による入力信号の共有方法の検討も検討時間の確保を前提に継続する。

### 2. 研究の具体的方法

研究対象としては、原子力機構JT-60でのCCS法を用いた実時間プラズマ断面位置形状再構築システムをプラズマ境界力学実験装置(QUEST)への適用に於いて、図2に示すようなQUESTの幾何学体系を踏まえ、昨年度に引き続き以下の検討を行う。①フラックスループ及び磁気プローブを考慮したCCS法の最適化について検討する。②幾何学体系を踏まえた実験データから、真空容器などプラズマ周辺の導体を流れる渦電流の影響の推定手法を検討する。③プラズマ実時間制御システムや実時間プラズマ断面形状可視化システムの構築に向けた検討を継続する。特に、その実現には磁気センサーからのデータ転送/共有が鍵となるが、その有力な方法「メモリ共有方式」

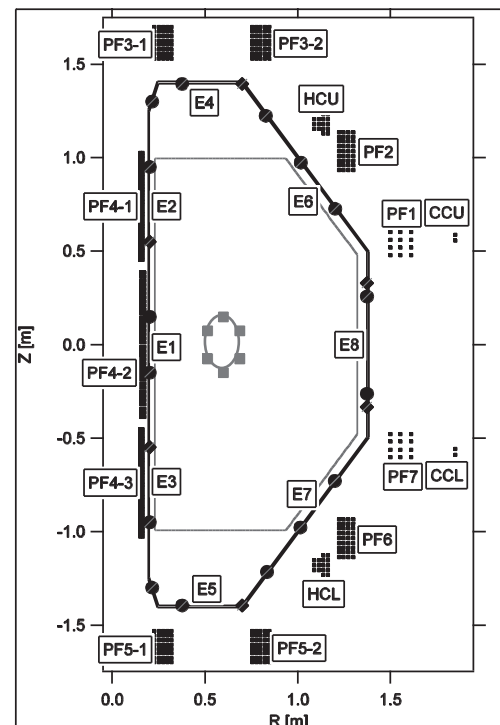


図 2: QUEST のポロイダル断面図

に用いる「リフレクティブ・メモリボード」が、QUEST実時間制御システムを構成するNI（ナショナル・インスツルメンツ社）製のPXIバスシステムに対応可能であることを昨年度確認したことを受けて、実現に向けての技術課題の検討を可能な限り進める。

### 3. 結果概要

#### 3.1 2種類の磁気センサーを用いたQUESTダイバータ配位プラズマ断面形状再構成

QUEST ( $B_t = 0.25$  T,  $R = 0.68$  m,  $a = 0.40$  m) では球状トカマクプラズマの定常維持法の一方法として、OHプラズマにて高密度ダイバータ配位プラズマを生成し、EBW電流駆動により定常維持することを計画している。

磁気プローブ8本の増設により、これまでのフラックスループ21本と共に2種類の磁気センサーを

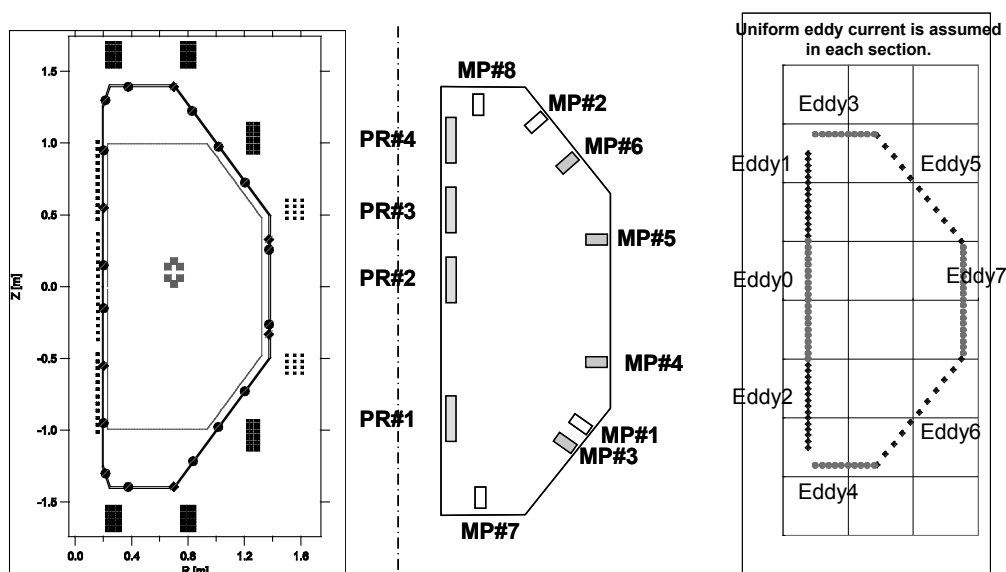


図3: 21本の磁束ループ (FL)、8本の磁気プローブ (MP) 配置と真空容器8分割の渦電流

用いることにより、真空容器渦電流の影響の考慮の精度が向上し、ダイバータプラズマ断面形状の高精度化が可能となった。また、渦電流については、図3の一番右に示すように作年度6種類だったものを、8種類の一様電流に自由度を増やして配置した。

これら磁気センサー及び渦電流を考慮してCCS法に基づくQUESTプラズマの高精度再構築を行った。

PF35-12内外直列ダイバータコイルを用いて低三角度(キャンディ状)OHダイバータ配位を形成し、PF35-1内側ダイバータコイルを用いて高三角度(D形)OHダイバータ配位を形成した。ダイバータ配位プラズマはTASK/EQUコードを用いて磁場配位を計画し、生成されたプラズマ境界の形状は2種類の磁気センサー(磁束ループ、磁気プローブ)からの信号に基づいてCCS(コーシー条件面)法[1]にて再構成した。その再構成結果はダブルヌルダイバータ配位を示した(図

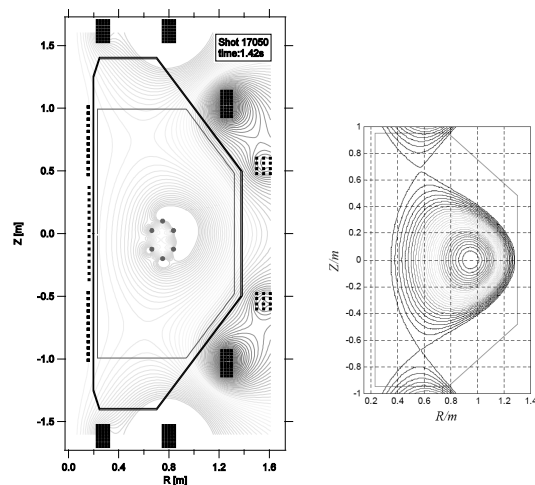


図4: PF35-12内外直列ダイバータコイルを用いた低三角度OHダイバータ配位(左:QUEST CCS、右:Windows E-FIT)

4). また、その再構成結果をEFITコードによるフィッティング結果と比較検討した。

現状の OH プラズマには高エネルギー電子が存在し、非等方的圧力分布を有する可能性がある。その場合、通常の平衡解析は困難となるが、CCS 法は非等方的にもかかわらず、プラズマ形状を正確に再構成することが可能である[2]。

磁束ループに加えて、磁気プローブを真空容器内面に設置したので、CCS を磁気計測面に設置することが可能である。図 5 に、(ケース1)磁束ループ 21ch のみ、(ケース2)磁気プローブ 3ch 追加、(ケース3)EFIT による再構成磁気面を例として示す。センサーの増加は、渦電流の影響も、求める自由度が上昇したことから精度の向上が図れることが判った。

さらに境界積分方程式を磁気センサー設置面に適用することにより、真空容器に流れる渦電流および真空容器外に位置する PFC (ポロイダル磁場コイル) は、磁場及び磁束の計測面内での内挿計算が良好であるという前提の下で、考慮する必要がなくなる。また、高周波電流駆動プラズマにおいて、閉磁気面外の開磁気面に存在するプラズマ電流の効果を、開磁気面上に仮想導体または仮想 PFC を仮定することにより、計算することが可能となるかどうかについても検討したので次節で述べる。

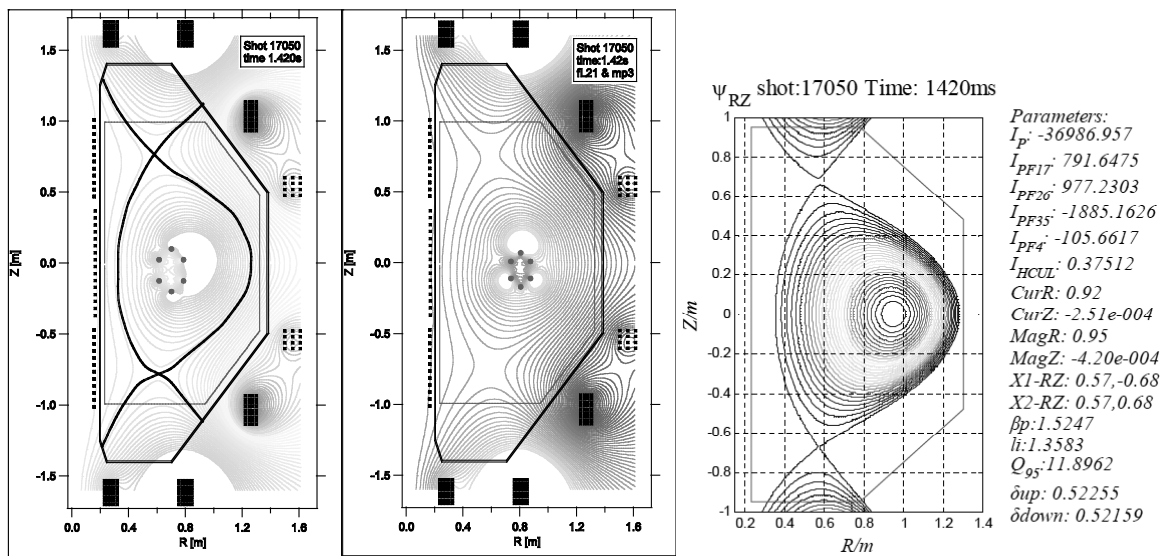


図5: ダイバータプラズマの再構築例  
(左: 磁束ループ21chのみ、中: 左に磁気プローブ3ch追加、右: EFITによる再構成磁気面)

### 3.2 仮想インベッセルコイルを用いたQUESTダイバータプラズマ形状再構成

QUESTでは球状トカマクプラズマの定常維持法のために、OHプラズマにてダイバータ配位を形成し、EBW電流駆動により定常維持することが計画され、PF35-12直列ダイバータコイルを用いたダブルヌル的なダイバータ配位とPF35-1内側ダイバータコイルを用いたD形ダイバータ配位について、2種類の磁気センサー(フラックスループ、磁気プローブ)を用いてダイバータ配位プラズマ断面形状をCCS法にて再構成出来るかどうかを確認することを意図した。

RF立上/維持プラズマに関しては、電流密度分布が閉磁気面より低磁場側にシフトしていることが推定され、一方、EFIT解析では、閉磁気面内に電流密度分布を仮定するため、電流密度分布は閉磁気面内で低磁場側にシフトするとともに、強磁場側に異符号の電流密度領域が現れることが判明した。

そこで、2種類の磁気センサー(FL, MP)信号により拘束条件を増した場合に、仮想インベッセルコイルを配置して、EFIT解析と組み合わせて、磁気面外電流の対処を行った。また、圧力分布の異方性に依存しないCCS法を適用した場合の再構成を含め検討した。これらの検討結果を以下に

まとめる。

(1)閉磁気面外に流れているプラズマ電流を仮想インベッセルコイルにて模擬して、閉磁気面内に流れているプラズマ電流に関して平衡の式を解き、EFITにて解析した結果、以下が判明。

- ①仮想インベッセルコイルを仮定すれば、平衡の式を満足する閉磁気面が得られる。
- ②閉磁気面外に流れている電流を仮定しなければ、横長で、電流密度分布が低磁場側にシフトしたダイバータ配位で、閉磁気面内の強磁場側には異符号の電流密度領域が現れる。
- ③ $R=1.2\text{m}$ ,  $Z=0\text{m}$ に仮想インベッセルコイルを設置すれば、外側ヌルのダイバータ配位が形成。
- ④EFIT解析においては、仮想インベッセルコイルの周りに閉磁気面プラズマができています。
- ⑤仮想インベッセルコイルにプラズマ電流の約30%の電流を仮定すれば、強磁場側における異符号の電流密度領域が消滅する。

(2)以下の方策の検討が重要である。

- ①閉磁気面外に流れる電流を考慮した電流駆動法を検討する必要がある。例えば、RFの入/切を繰返すことなどで高E電子による電流をバルクに移す必要がある。
- ②オーム加熱コイルなどによりバルクプラズマを最初に生成する必要がある。
- ③高温壁を考慮した解析が必要である。また大断面プラズマを生成する方策が必要である。
- ④非円形度を上げるならば、不安定性抑制のため高速応答電源が必要である。
- ⑤非円形度を上げなければ、大きなダイバータコイル電流が必要となる。

(3)CCS法を用いる場合のポイントは以下である。

- ①CCS法では異方性圧力分布でも解ける。但し仮想インベッセルコイルの設置必要。
- ②磁気センサー以外の計測データと比較で検証する。軟X線カメラ像、可視カメラ像、など。
- ③強磁場側の異符号の電流密度領域を無くなると期待される。
- ④正則化にチョコノフ条件を課すことで、精度の向上が図れる。図6に結果を示す。内側ダイバータ配位が再構築することに成功した。

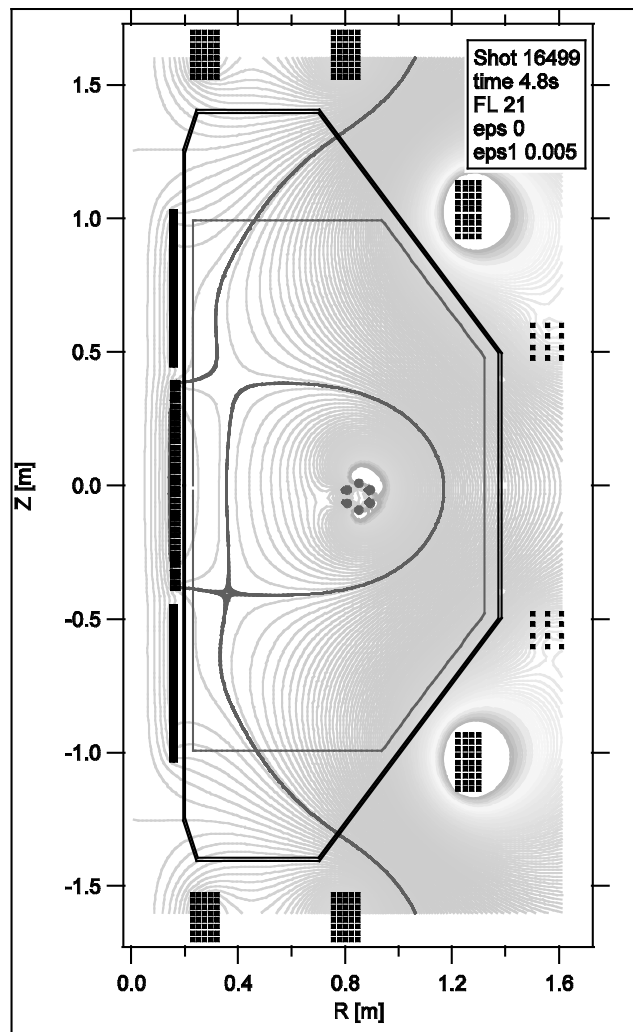


図6: インベッセルコイルを仮設置して、チョコノフ正則化条件を課したCCS法によるダイバータ配位の再構築結果

### 3.3 CCS法を用いたQUESTプラズマ断面形状実時間制御用再構築に向けた制御システム構成

プラズマ実時間制御システムの構築に向け、磁気センサーからのデータ共有を「リフレクティブ・メモリボード」で行うことで、QUEST実時間制御システムを構成することを目指した。しかし、作業時間、コストなどの制約から今年度は実施しないこととし、別途次年度以降再度検討することとした。

#### 4. まとめ —今後の展開を期待して—

以上の検討結果から以下の成果が得られた。

- 従来のフラックスセンサーに加え、磁気プローブセンサーも加えて、渦電流を考慮したCCS法によるプラズマ最外殻磁気面の再構成精度が一段と向上した。
- RF駆動によるQUESTプラズマの再構築のために、仮想インベッセルコイルを設置する試みを行い、チコノフの正則化法による非適切性回避策を講じたCCS法により、内側ダイバータ配位プラズマの高精度再構成が可能である事を示した。

今後は、さらに以上の成果を踏まえて以下の展開が期待される：

- QUEST実時間制御システムに、CCSによるプラズマ断面形状実時間再構築システムを実現する。

#### 参考文献

- [1] K. Kurihara, "A new shape reproduction method based on the Cauchy-condition surface for real-time tokamak reactor control" Fusion Eng. Des., 51-52 (2002), pp. 1049-1057.
- [2] K. Nakamura, Y. Jiang, X. Liu, O. Mitarai, K. Kurihara, Y. Kawamata, M. Sueoka, M. Hasegawa, et al.: Eddy Current-Adjusted Plasma Shape Reconstruction by Cauchy Condition Surface Method on QUEST, Fusion Engineering and Design, Vol.86 (2011) 1080-1084.

#### 5. 関連文献

##### <今年度(H24年度)分>

- [a] 中村一男, 劉 曉龍, 薛 二兵, 夏 凡, 御手洗 修, 栗原 研一, 川俣 陽一, 末岡 通治, 長谷川 真, 徳永 和俊, 関子 秀樹, 花田 和明, 藤澤 彰英, 松岡啓介, 出射 浩, 永島 芳彦, 川崎 昌二, 中島 寿年, 東島 亜紀, 荒木 邦明, 福山 淳: 2種類の磁気センサーを用いた QUEST ダイバータ配位プラズマ断面形状再構成, 第9回核融合エネルギー連合講演会、神戸国際会議場(兵庫県神戸市、2012年6月28-29日)、29A-26p。
- [b] K. Nakamura, X.L. Liu, E.B. Xue, F. Xia, O. Mitarai, K. Kurihara, Y. Kawamata, M. Sueoka, M. Hasegawa, K. Tokunaga, H. Zushi, K. Hanada, A. Fujisawa, K. Matsuoka, H. Idei, Y. Nagashima, S. Kawasaki, H. Nakashima, A. Higashijima, K. Araki, A. Fukuyama: Plasma Shape Reproduction with Two Kinds of Magnetic Sensors on QUEST, 27th Symposium on Fusion Technology, Liege, Belgium (Sept. 25, 2012) P2-60.
- [c] 中村一男, 劉 曉龍, 薛 二兵, 夏 凡, 御手洗 修, 栗原 研一, 川俣 陽一, 末岡 通治, 長谷川 真, 徳永 和俊, 関子 秀樹, 花田 和明, 藤澤 彰英, 松岡啓介, 出射 浩, 永島 芳彦, 川崎 昌二, 中島 寿年, 東島 亜紀, 荒木 邦明, 福山 淳: 仮想インベッセルコイルを用いた QUEST ダイバータプラズマ形状再構成, 第29回プラズマ・核融合学会年会(クローバープラザ福岡県春日市 2012年11月27-30日)、30D40P。
- [d] K. Nakamura, H. Fujita, X.L. Liu, E.B. Xue, F. Xia, O. Mitarai, K. Kurihara, Y. Kawamata, M. Sueoka, M. Hasegawa, K. Tokunaga, H. Zushi, K. Hanada, A. Fujisawa, K. Matsuoka, H. Idei, Y. Nagashima, S. Kawasaki, H. Nakashima, A. Higashijima, K. Araki, A. Fukuyama: QUEST Divertor Plasma Shape Reproduction, Workshop on ST Seoul National Univ. (Jan. 14 - 16, 2013)

##### <H23年度分>

- K. Nakamura, Y. Jiang, X. Liu, O. Mitarai, K. Kurihara, Y. Kawamata, M. Sueoka, M. Hasegawa, et al.: Eddy Current-Adjusted Plasma Shape Reconstruction by Cauchy Condition Surface Method on QUEST, Fusion Engineering and Design, Vol.86 (2011) 1080-1084.
- K. Nakamura, X.L. Liu, M. Tomoda, T. Yoshisue, O. Mitarai, M. Hasegawa, K. Tokunaga, et al.: Effect of Shell Cut and Diagnostic Port on Stabilizing Characteristics of Vertical Position Instability on QUEST, APFA 2011, Guilin (2011) P1p2-34.
- K. Nakamura, X.L. Liu, T. Yoshisue, O. Mitarai, K. Tokunaga, M. Hasegawa, et al.: Venturini Method and Space Vector Modulation Method in Matrix Converter, ICEE2011, Hongkong (2011) A367.
- 吉末竜也, 中村一男, 劉 曉龍, 薛 二兵, 長谷川 真, 徳永 和俊, 御手洗 修, 他: QUEST プラズマ制御のためのマトリクスコンバータの検討, 電気関係学会九州支部連合大会, 佐賀 (2011) 01-1A-01.
- X.L. Liu, K. Nakamura, Y. Jiang, T. Yoshisue, O. Mitarai, M. Hasegawa, K. Tokunaga, et al.: Study

- of Matrix Converter as a Current-Controlled Power Supply in QUEST Tokamak, Plasma Fusion Res., Vol.6 (2011) 2405137.
- Xue Erbing, Luo Jiarong, Liu Xiaolong, Kazuo Nakamura: Modeling of Vacuum Field in Start-up in EAST, ITC-21, Toki (2011) P1-54.
  - K. Nakamura, X.L. Liu, E.B. Xue, O. Mitarai, K. Kurihara, Y. Kawamata, M. Sueoka, M. Hasegawa, K. Tokunaga, et al.: QUEST Shape Reproduction Based on CCS Method with Two Kinds of Magnetic Sensors, Plasma Conference 2011, Kanazawa (2011) 22P132-P.
  - X.L. Liu, K. Nakamura, T. Yoshisue, O. Mitarai, M. Hasegawa, K. Tokunaga, et al.: Robust Control Design for Plasma Vertical Instability of QUEST, APFA 2011, Guilin (2011) P1p2-39.

<H22年度以前分>

- 中村一男, 姜 毅, 劉 曉龍, 御手洗修, 栗原研一, 川俣陽一, 末岡通治, 長谷川真, 他: CCS法に基づくQUESTプラズマ断面再構成に及ぼす渦電流の影響, 第8回核融合エネルギー連合講演会, Takayama (June 11, 2010) 11B-10p.
- K. Nakamura, Y. Jiang, X. Liu, O. Mitarai, K. Kurihara, Y. Kawamata, M. Sueoka, M. Hasegawa, et al.: Eddy Current-Adjusted Plasma Shape Reconstruction by Cauchy Condition Surface Method on QUEST, 26th Symposium on Fusion Technology, Porto (Sept. 29, 2010) P3-158.
- 中村一男, 姜 毅, 劉 曉龍, 御手洗修, 栗原研一, 川俣陽一, 末岡通治, 長谷川真, 他: QUESTにおける各種電流駆動時のCCS法による断面形状再構成, 第27回プラズマ・核融合学会, Sapporo (Dec. 1, 2010) 01P54.
- X.L. Liu, K. Nakamura, Y. Jiang, T. Yoshisue, O. Mitarai, M. Hasegawa, K. Tokunaga, et al.: Study of a Matrix Converter for Plasma Vertical Position Control on QUEST Tokamak, ITC-20, Toki (2010) P2-69.
- 中村一男, 劉 曉龍, 吉末竜也, 御手洗修, 徳永和俊, 長谷川真, 他: マトリクスコンバータにおけるVenturini法と空間ベクトル法, 電気学会半導体電力変換研究会, Kobe (Jan. 21, 2011) SPC-11-024.
- K. Nakamura, et al., "Characteristics of SVD in ST Plasma Shape Reconstruction Method Based on CCS" Journal of Plasma and Fusion Research SERIES, Vol.8 (2009), pp. 1048-1051, Sep. 2009.
- K. Nakamura, et al., "Eddy Current Effect on Plasma Shape Reconstruction Based on CCS Method in CPD and QUEST" Asia Plasma Fusion Association 2009, Festival City AUGA, Aomori, Japan, Oct. 27<sup>th</sup>-30<sup>th</sup>, 2009.
- 中村一男, 他, 「CCS法によるSTプラズマ断面形状再構成における特異値分解の特徴」第25回プラズマ・核融合学会 年会 予稿集 (2008).
- 中村一男, 他, 「CCS法によるSTプラズマ断面形状再構成における特異値分解」第24回プラズマ・核融合学会 年会 予稿集 (2007).
- 姜 毅, 他, 「渦電流を考慮したCCS法によるQUEST球状プラズマ断面形状の実時間再構成」第13回プラズマ・核融合学会年会(九州・沖縄・山口支部大会) 予稿集 (2009).
- 松藤伸治, 他, 「真空容器渦電流分布を考慮したCCS法によるCPDプラズマ断面形状再構成」第12回プラズマ・核融合学会(九州・沖縄・山口支部大会) 年会 予稿集 (2008).
- F. Wang, K. Nakamura, O. Mitarai, K. Kurihara, Y. Kawamata, M. Sueoka, K. N. Sato, H. Zushi, K. Hanada, M. Sakamoto, H. Idei, M. Hasegawa, et al.: *Engineering Sciences Reports, Kyushu University*, Vol. 29, No. 1 (2007) 7-12.

(以上)

## 1. はじめに

低Z材であるグラファイトは、長い間、核融合実験装置のダイバータ板および第1壁材として用いられているが、炭素材特有の化学スパッタリングによる損耗や核融合燃料であるトリチウムの炉壁炭素材および炭素再堆積膜への物理・化学的吸蔵が問題視され、ダイバータ板材料としては高融点金属材であるタングステンに取って代われようとしている。しかしながら、タングステン材は、水素・ヘリウム照射によるブリスタリングやバブル形成、高い熱衝撃による溶融・ドロップレット・クラックの発生等、将来の核融合炉ダイバータ板材料として使用するには問題点も多いのが現状である。核融合炉ダイバータ材料開発研究の大半がタングステン材使用に向けて行われる中で、本研究はグラファイト材の欠点とされるトリチウム吸蔵を制御・抑制する手法の開発を行い、将来の核融合炉における炭素材使用の可能性を検討すること目的としている。決定的なダイバータ材料ではないタングステン材の開発研究に加えて、本研究のような補完的材料基礎研究を行うことは、QUESTにおけるプラズマ-壁相互作用研究に大きく貢献するものである。

## 2. 直流アーク放電による不純物導入実験

## 2-1 実験装置

アーク放電により不純物導入実験は、Heliotron-DR 装置において行った。プラズマは定常電力:3.3 kW, 周波数: 13.56, および 27.12 MHz の高周波により生成した。また、弱い閉じ込め磁場としてヘリカル磁場 200 G, トロイダル磁場 40 G を印加している。アーク放電には同軸型炭素電極(内部電極外形:12 mm, 外部電極内径:18 mm)を用いて、電極間に直流電圧(最大電圧 400 V)を印加し約 20 A でのアーク放電による炭素不純物供給を行った。

## 2-2 実験結果

図1に炭素電極を用いたアーク放電時の画像、図2にアーク放電領域の発光スペクトルと水素/メタンプラズマ放電時にメタンガス導入部の発光スペクトルの比較を示す。アーク放電中には強いC<sub>2</sub>の分子線の発光が観測されており、主に炭素粒子として放出されていることがわかる。また、観測されたスペクトルには連続スペクトル成分も含まれていることから、黒体輻射温度を評価したところ約 2,900 K となった。実験後にシリコンサンプル上の堆積膜の膜厚をエリプソメータを用いて測定したところ、約 10 nm の膜ができており、アーク放電による炭素不純物供給でもメタンガス導入時と同等の炭素膜の成長が確認できた。図2に質量分析器を用いてアーク放電およびメタンガス導入時の排出ガス分析を行った結果を示す。アーク放電時にもエチレン(C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>)等の炭化水素が観測されている。

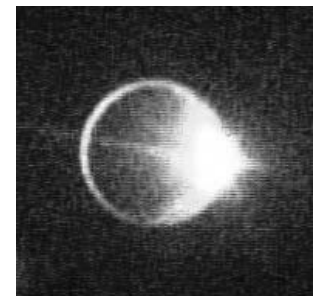


図1 炭素電極アーク放電

## 2-3 今後の予定

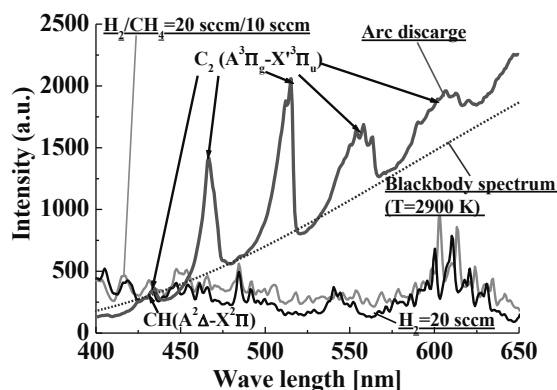


図2 炭素アーク放電およびメタンガス導入時の発光スペクトル

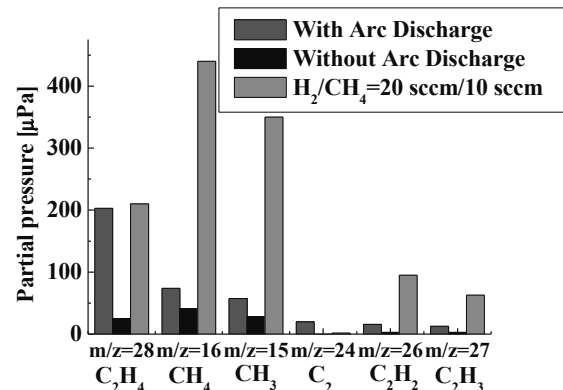


図3 炭素アーク放電およびメタンガス導入時の排出ガス分析結果

Heliotron-DR 装置を用いた炭素電極アーク放電により水素プラズマ中への炭素不純物導入実験を行い、炭素堆積膜の成長を確認した。今後、重水素中での同様の実験やタンゲステンなどの高融点金属電極を用いたアーク放電により金属不純物導入実験を行う予定である。

### 3. 低温重水素プラズマ中への窒素導入による炭素堆積膜成長抑制

本研究では、同様の装置を用いて核融合炉における壁周辺プラズマでの不純物膜堆積、水素同位体吸蔵に関する知見を得るため、重水素/メタンプラズマを試料へ照射する。この条件下において窒素添加による炭素膜堆積抑制効果およびダスト生成抑制効果を調べた。

#### 3-1 実験装置

本実験でのプラズマ照射の実験条件は、電力が定常 2.3 kW、ガス流量は重水素が 20 sccm、メタンは 1 sccm とした。動作ガス圧は  $P_f \sim 0.64$  Pa で、生成したプラズマの電子温度は 7-10 eV、電子密度は  $(0.5-1.4) \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$  である。閉じ込め磁場としてヘリカル磁場 200 G、トロイダル磁場 40 G を印加した。照射台には、外部から温度制御を行うために熱電対とヒーターを取り付けた。試料にはシリコンを用いた。評価方法として、分光観測と四重極型質量分析、またプラズマ照射後の試料に対しては走査型電子顕微鏡とエリプソメータ、触針式段差膜厚計を用いた。

#### 3-2 実験結果

図 4 に重水素/メタンプラズマおよび重水素/メタン/窒素プラズマの質量分析結果を示す。メタンを導入しているのに  $\text{mass}=15$  が増加しないのはメタンの炭素原子がプラズマ中にある水素に比べて多量にある重水素と結合して  $\text{CD}_3$  や  $\text{CD}_4$  などになるからだと考えられる。窒素添加後は  $\text{NH}$ ,  $\text{CN}$  や  $\text{DCN}$  分子などの非凝集性分子が増加している。図 5 に重水素/メタン/窒素プラズマの分光観測結果を示す。揮発性の  $\text{CN}$  や  $\text{NH}$  分子の強い発光が確認できた。 $\text{CN}$ ,  $\text{NH}$  分子などの生成は水素/メタン/窒素プラズマ実験でも観測されており、これら非凝集性分子の生成により炭素膜堆積の抑制をもたらすと考えられる。図 6 に軽水素プラズマ中への窒素導入時の炭素膜厚と非凝集性分子発光の一例として  $\text{CN}$  分子線発光強度の窒素導入割合依存性を示す。水素ガスに対して数%の窒素を添加することで強い炭素膜堆積の抑制効果があることが分かる。また、炭素膜成長に対して強い温度依存性があることも初期実験で判明していることから今後より詳細な実験を行う予定である。

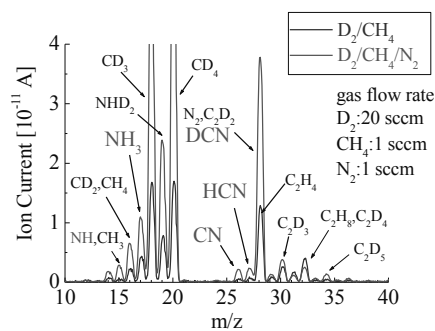


図 4 窒素導入の有無による排出ガスの質量スペクトル

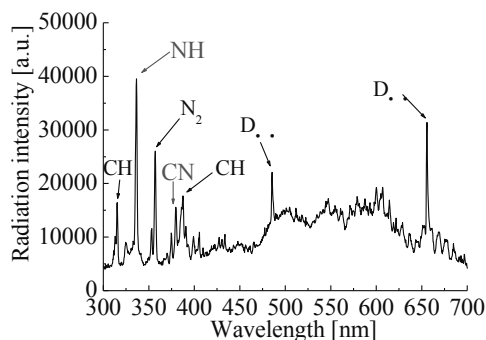


図 5 窒素導入時の発光スペクトル

## 4 まとめと今後の計画

重水素プラズマ中への窒素導入による炭素膜堆積および重水素吸蔵に関する実験の着手した。また、メタンガスに代わる炭素不純物導入法として、同軸炭素電極を用いたアーク放電による炭素不純物導入試験を行い、安定に炭素不純物の導入が行えることを確認した。今後、タンゲステン電極等の金属電極を用いたアーク放電により金属不純物導入試験を行うとともに各種不純物堆積膜中への重水素吸蔵特性を調べるとともに、窒素ガス導入による堆積膜中への吸蔵抑制効果と重水素を含む非凝集性分子の炉外排出特性を明らかにする予定である。

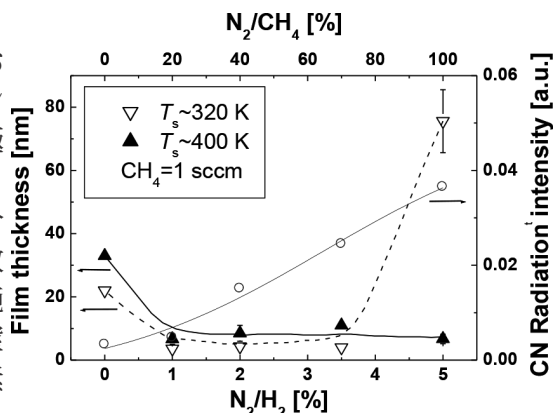


図 6 窒素導入量に対する炭素堆積膜厚変化と CN 分子線発光強度の変化

## 1. 目的

核融合科学研究所では、低放射化バナジウム合金の高温強度と耐照射脆化特性をさらに改善するため、微量 Y 添加をした先進的なバナジウム合金の試作開発を行っている。これまでに、Y 添加で酸素不純物による固溶硬化を低減できることが分かっている。酸素は照射欠陥と相互作用して照射硬化を促進させる元素であるため、これを微量 Y 添加で制御できれば照射硬化を軽減できると期待される。一方、Y 添加で強度は低下するが、それは Cr 量の増量で補うことが可能であることも明らかになってきた。

材料の使用温度下限を定めるのは比較的低温(400~500°C)での中性子照射脆化であり、上記の新合金についても従来のバナジウム合金と比較するために照射データを取得するのが急務である。中性子照射試験は試験体積が限られ、また照射の機会も少ないために、照射量や照射温度等の照射条件を系統的に変化させた試験が困難である。一方、九大応力研の高エネルギーイオン発生装置は、短時間で大きな材料損傷量を与えることができるために、試験条件を系統的に変化させた照射試験が可能となる。ただし、材料損傷が試料表面の 1 μm 以下に限られること、短時間に大きな損傷を与えるために照射損傷組織発達が変化するため、得られた照射データからバルク材の中性子照射特性を予測するには、系統的な実験とモデリングによって照射損傷メカニズムを理解する必要がある。

本研究では、九大応力研の高エネルギーイオン発生装置を用いて、微量 Y 添加バナジウム合金に重イオン照射実験を行い、低温での照射脆化の主因となる照射硬化とそのメカニズムを、微小押込みと電子顕微鏡観察による照射損傷組織観察から明らかにする。

## 2. 実験方法

大学共通材料である V-4Cr-4Ti 合金(NIFS-HEAT-2)及び、これを基本組成として微量 Y 添加等により試作した合金試料を用意した。試料組成を表 1 に示す。今年度は V-4Cr-4Ti-0.019O (NIFS- HEAT- 2)及び V-4Cr-4Ti-0.15Y-0.0090O に対し、九大応力研の高エネルギー

表 1 V 合金の組成

Code	Cr	Ti	Y	C	N	O	O 濃度
V-4Cr-4Ti-0.019O (NH2)	4.11	4.15	< 0.002	0.025	0.009	0.019	低
V-4Cr-4Ti-0.051O	4.40	4.51	< 0.002	0.014	0.015	0.051	高
V-4Cr-4Ti-0.15Y-0.011O	4.51	4.59	0.09	0.011	0.013	0.011	低
V-4Cr-4Ti-0.15Y-0.0090O	4.23	4.17	0.11	0.011	0.009	0.0090	低
V-4Cr-4Ti-0.15Y-0.27O	3.87	3.99	0.06	0.010	0.018	0.27	高
V-6Cr-4Ti-0.15Y-0.0095O	6.21	4.16	0.08	0.013	0.011	0.0095	低
V-6Cr-4Ti-0.15Y-0.089O	6.81	4.10	0.08	0.0080	0.016	0.089	高
V-10Cr-4Ti-0.15Y-0.0098O	9.87	3.72	0.18	0.011	0.0050	0.0098	低

イオン発生装置を用いて 0.1~10 dpa の 3MeV Cu イオン照射を行った。照射温度は 200°C である。照射後の試料について、核融合研の微小押し込み試験機で表面の照射硬化を測定した。九大応力研の電解研磨装置で電子顕微鏡試料を作製し、透過電子顕微鏡で表面の照射損傷組織の観察を行った。

### 3. 結果と考察

図 1 はイオン照射後の表面の押し込み硬さを示す。横軸は押し込み深さである。イオン照射試料では、表面の約 1 μm の領域のみが照射損傷を受けているため、押し込み深さが大きい場合（押し込み深さ 1 μm 以上）には非損傷領域の影響が大きく、照射による硬さの変化は小さかった。一方、押し込み深さ 0.6~0.8 μm 以下から 0.2 μm までは明確な照射硬化が確認された。1 dpa と 10 dpa での照射硬化の違いは大きくなかった。Y 添加合金 (V-4Cr-4Ti-0.15Y-0.0090O) の方が無添加合金 (V-4Cr-4Ti-0.0190) よりも照射硬化が小さいことが示唆された。図 2 に照射損傷組織を示す。数 nm のサイズの高数密度 (~5×10<sup>22</sup> m<sup>-3</sup> 程度) の照射欠陥が観察された。Y 添加合金と無添加合金の間でサイズと数密度の大きな違いはなく、上記の Y 添加による照射硬化の抑制と、微細組織発達の相関についてはさらに詳細な分析と検討をすることが今後の課題である。

### 4. 成果報告

(1) 宮澤健, 長坂琢也, 菱沼良光, 室賀健夫, 渡邊英雄, “イットリウム添加バナジウム合金 V-4Cr-4Ti-0.15Y の照射硬”, プラズマ・核融合学会第 29 回年会, 2012 年 11 月 27 日~ 30 日, クローバープラザ, 福岡県春日市

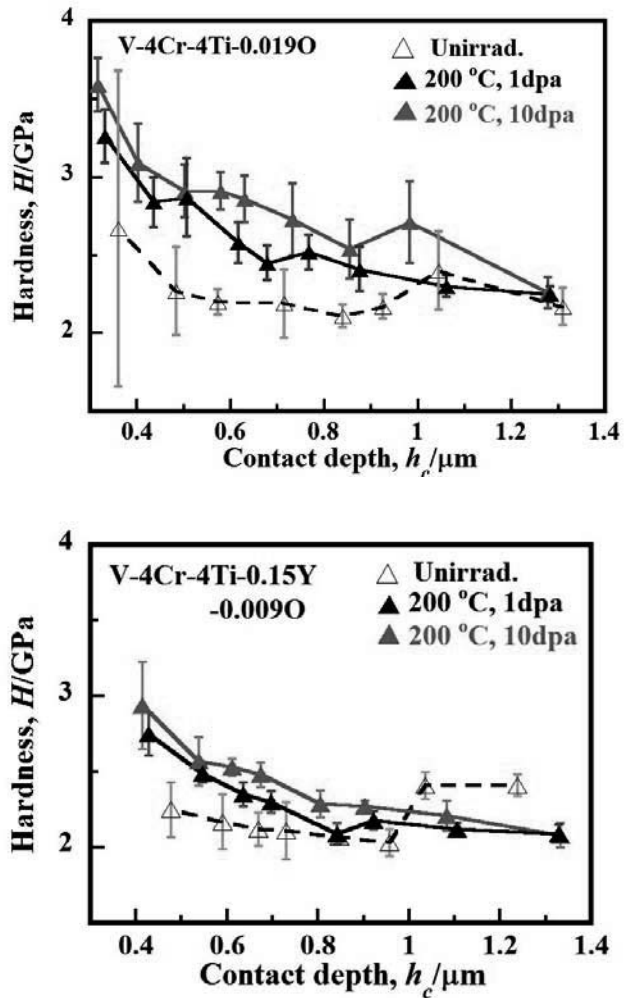


図 1 微小押し込み硬度の押し込み深さ依存性

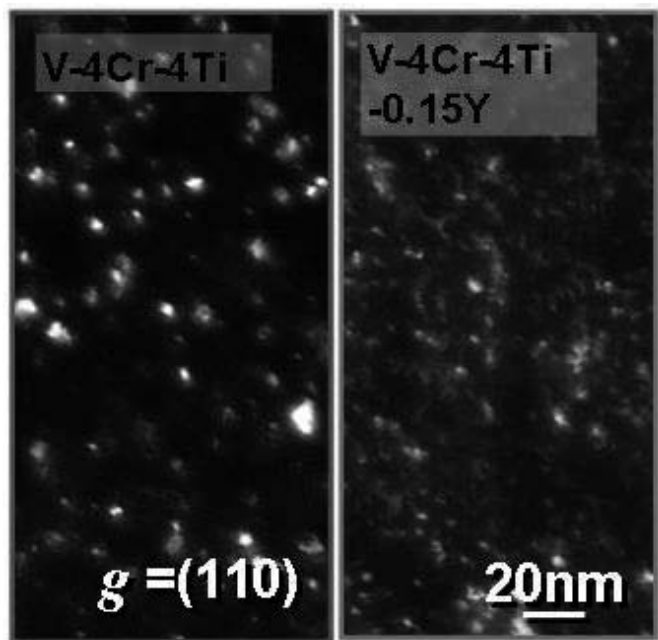


図 2 200°C、1 dpa 照射後の照射欠陥組織 (暗視野像)

## 24 FP-32

### プラズマ照射によって金属材料に注入された水素の蓄積とその放出機構の解明

九州大学・総合理工学研究院 大塚 哲平

**【目的】** 核融合原型炉の第一壁候補材料である低放射化フェライト・マルテンサイト鋼 (F82H) にはタングステン (W) を被覆することが検討されている。このため、燃料である放射性水素同位体トリチウムが W 被覆材および F82H 基板にどのように蓄積されるのかを明らかにすることは安全性確保の観点から重要である。前年度の研究では、W 被覆 F82H 鋼にトレーサーレベルのトリチウムを含んだ水素を注入し、その注入された水素の深さ分布をトリチウムイメージングプレート (TIP) 法を用いて測定することにより、W 被覆層および F82H 基板への水素進入機構を明らかにした。本年度は、W 被覆層および F82H 基板中に進入した水素が真空加熱によりどのように放出されるのか、その放出機構を明らかにすることを目的とした。

**【実験】** 大気圧プラズマ溶射 (APS) 法または減圧プラズマ溶射 (VPS) 法によって、W 粒子を F82H 基板 (2.6 mm 厚さ) 上に 1 mm 厚さになるように積層させたものを試料 (3.6 mm 厚さ) として用いた。以後、APS-W/F82H および VPS-W/F82H と呼ぶ。溶射に用いた平均 W 粒子径は VPS-W の場合 17  $\mu\text{m}$  および APS-W では 50  $\mu\text{m}$  であった。また、作製された W 被覆層の見かけの空隙率は前者が 0.6 % であり、後者が 6 % であった。

前年度において、図 1 に示すように、トリチウムを含んだ水素 ( $T/H=1.3 \times 10^{-4}$ ) の DC グロー放電プラズマによって、試料の W 被覆層表面にトリチウムを注入した。注入温度は 453 K または 533 K、注入時間は 2 時間とした。放電は、水素ガス圧力 2.6 mPa、DC 電圧 400 V で行った。放電終了後、試料を 233 K まで速やかに冷却し、トリチウムのその後の移動を防いだ。本年度は、放電プラズマ注入と同じガス圧力、温度でトリチウムを含んだ水素ガスに曝露し、試料中に水素を吸収させた試料も用意した。つぎに図 2 に示すように、ト

リチウム入射表面に対して垂直断面を切り出し、この断面のトリチウム  $\beta$  線強度分布を TIP 法により測定することにより、W 被覆層および F82H 基板中の入射方向へのトリチウム深さ分布を求めた。また、放電プラズマによりトリチウムを注入した試料を 673 K および 873 K で 10 分間、真空中で加熱し、試料中のトリチウムを放出させた後で、トリチウム深さ分布を調べた。

**【結果・考察】** 図 3 に、プラズマ注入またはガス吸収によって APS-W/F82H 中に蓄積したトリチウムの深さ分布を示す。453 K でプラズマ注入した場合、APS-W 被覆層の表面近傍に極めて高濃度のトリチウムが偏在しており (表面近傍の偏在成分)、これより深い領域では被覆層中にほぼ均一に分布していた (均一分布成分)。また、F82H 基板中ではトリチウム濃度が深さ方向に指数関数的に減衰しており、トリチウムが拡散進入していることが示唆された。573 K でプラズマ注入した場合には、APS-W 被覆層

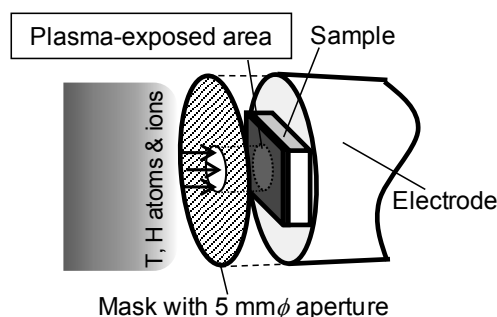


図 1 DC グロー放電による試料への水素 (トリチウム) 注入方法の概略

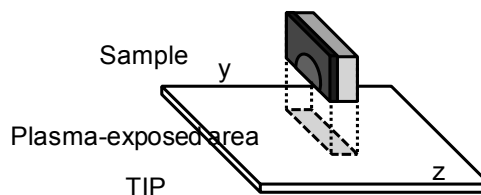


図 2 TIP 法における試料と TIP との配置状況の概略

の表面近傍の偏在成分は見られず、均一分布成分のみが観察された。F82H 基板では、473 K での注入時に比べて、より深くまでトリチウムが拡散進入しており、その濃度プロファイルが平坦になっていた。同じ温度・圧力条件でガス吸収させた場合には、APS-W 被覆層では均一分布成分しか見られず、そのトリチウム濃度はプラズマ注入したもの比べ、約半分程度であった。

図 4 は 573 K でのプラズマ注入によって VPS-W/F82H に蓄積したトリチウムの深さ分布が真空焼鈍によってどのように変化したのかを示している。図中、673 K で真空焼鈍した場合、VPS-W 被覆層中のトリチウム濃度分布は変化していないが、F82H 基板からはほぼ全てのトリチウムが放出されたことがわかった。873 K で真空焼鈍すると、VPS-W 被覆層中のトリチウム濃度はプロファイル形状を保ったまま、1/3 程度にまで減少した。

図 5 に、多孔質な W 被覆層およびその基板への水素（トリチウム）進入・蓄積および放出機構の概念図を示す。図中(a)は、放電プラズマから高いエネルギーをもったトリチウムが W 被覆層表面に入射した様子を表している。W 被覆層の表面近傍の偏在成分は、高エネルギーをもつ多量の水素（トリチウム）が入射することにより、表面近傍に欠陥が生成し、そこに水素が捕獲されたことによって生じたと考え

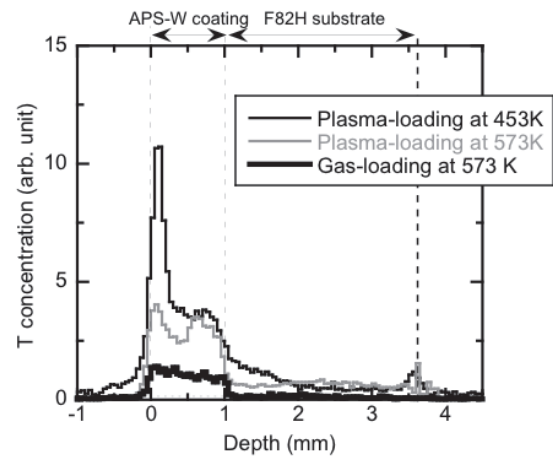


図 3 プラズマ注入法およびガス吸収法によって APS-W/F82H 中に蓄積したトリチウムの深さ分布

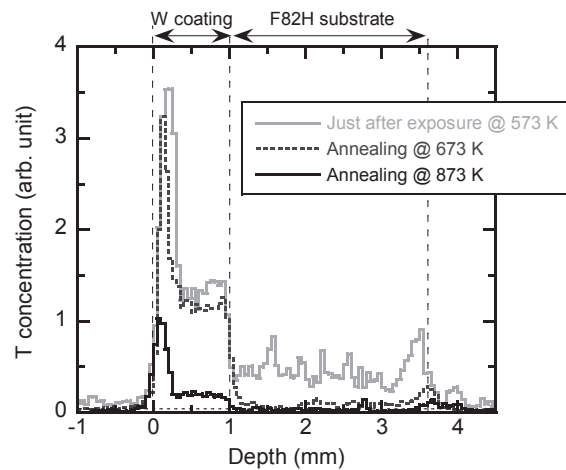


図 4 真空加熱放出による VPS-W/F82H 中のトリチウム深さ分布の変化

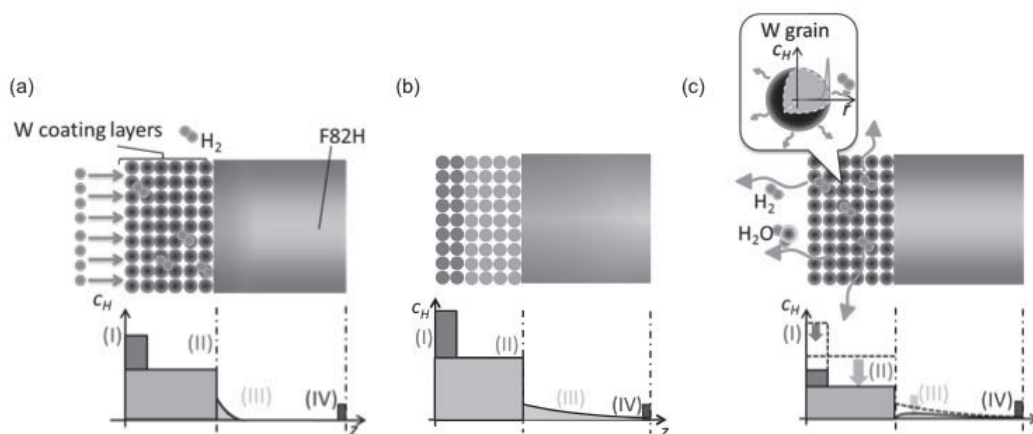


図 5 多孔質タンゲステン被覆層および F82H 基板への水素（トリチウム）進入・蓄積および放出機構の概念図

られる。また、均一分布成分はガス吸収のみによっても生じたことから、プラズマ注入された大部分の水素はガス状となって、W 粒子間の空隙を通過して内部に進入し、被覆層全体にほぼ均一に分布し、空隙表面（W 粒子表面）または W 粒子内部に捕獲されたものであろう。そうして、ガス状水素は W 被覆層と F82H 基板との界面に到達し、基板中に原子状となって溶解し、拡散によって深さ方向に進入したと考えられる（図 5(b)参照）。図 5(c)は、いったん W 被覆層や F82H 基板中に蓄積した水素が、進入・蓄積機構とは逆の過程を経て放出される様子を表している。本実験結果より、W 被覆層に捕獲された水素は放出されにくく、なかでも表面近傍に偏在した成分は均一分布成分よりも強く捕獲されており、真空加熱放出によっても取り除くことが難しいことが示唆された。



## 目的

核融合プラズマにおいては、時間尺度及び空間尺度の異なる諸現象（MHD、微視的乱流等）が定性的に異なる空間領域に跨って相互作用し、その結果として炉心の閉じ込め特性が決まる。それを総合的に理解し、予測・制御するためには、外部情報入力を伴う、輸送、MHD、乱流の相互作用を考慮したグローバルシミュレーションが必要であると認識されつつある。本研究ではプラズマ周辺における非線形 MHD 応答、L/H 遷移現象、非局所輸送、直線装置における乱流現象等、実験で観測されているさまざまな複合・非線形現象を解明するためのシミュレーション研究を行う。これらの現象はマルチスケール・マルチフィジックスであるため、モデリングや数値スキームの開発も同時に必要となる。これまで九大で開発されてきたシミュレーションコードをもとにモデルの拡張やコードの改良を行う。今年度は、非局所輸送のシミュレーション研究に進展が見られたのでその結果に関して報告する。

## 研究成果

LHD における ECRH 印可実験ではマクロスケールの揺らぎが観測されており、非局所輸送の候補と考えられている[1]。またペレット入射実験でも非局所輸送が観測されており[2]、その物理機構の解明は過渡輸送現象を理解する上で重要であると考えられる。解析モデルとして積分型非局所フラックスモデルを用いた先行研究[3, 4]が存在するが、いずれも 1 次元モデルとして定式化されている。本研究では円柱座標系における 4 場簡約化 MHD モデルを用いた非線形シミュレーションにより、定常状態に達した抵抗性バルーニング乱流中に周辺密度ソースを印可し、プラズマの応答を観測する。ある時間帯で周辺密度ソースを切り、その後の密度分布の時間発展を追跡する。これによりペレット入射実験を模擬し、密度発展方程式の対流微分項に起因する非局所輸送を解析する。4 場簡約化 MHD モデルは、渦方程式、オーム則、磁力線方向のイオンの運動方程式、密度の発展方程式から構成され規格化はポロイダルアルフベン時間  $\tau_{ph}$  とプラズマの小半径  $a$  を用いている[5]。密度の発展方程式に以下のようなソース項を導入する。

$$\frac{\partial n}{\partial t} + [\phi, n] = \beta[r \cos \theta, \phi - \delta_e n] + \beta(\delta \nabla_{||} j - \nabla_{||} v) + D \nabla_{\perp}^2 n + S_n$$

ここで  $j = -\nabla_{\perp}^2 A$ ,  $\delta = c / (a \omega_{pi})$ ,  $\delta_e = \delta / (1 + \tau)$ ,  $\tau = T_i / T_e$ 。シミュレーションにおいて  $D = 10^{-6}$  を用いた。従って衝突による拡散時間は  $\tau_{coll} = 10^6 \tau_{ph}$  と評価される。ソース項は

$S_n = S_{AMP} \exp(-(r^2 + r_s^2 + 2rr_s \cos \theta) / 2\Delta)$  で与えた ( $r_s = 0.8, \Delta = 0.1$ )。図 1 に内部エネルギーフリー成分の時間発展を示す。支配的な (0/0) モード（それぞれポロイダルモード数/トロイダルモード数）は磁気面平均された密度を表している。(1, 0) モードはいわゆる対流胞であり、(11, -3), (12, -3), (13, -3) 等は印可ソース近傍の  $q=4$  面で不安定化したバルーニングモードを示し

ている。t=900 において定常乱流状態に達した後、t=980 において密度ソースを印可し、その後 t=1200 においてソースを切った。その後の密度分布の発展を追跡した。図 2 に密度分布の時間発展

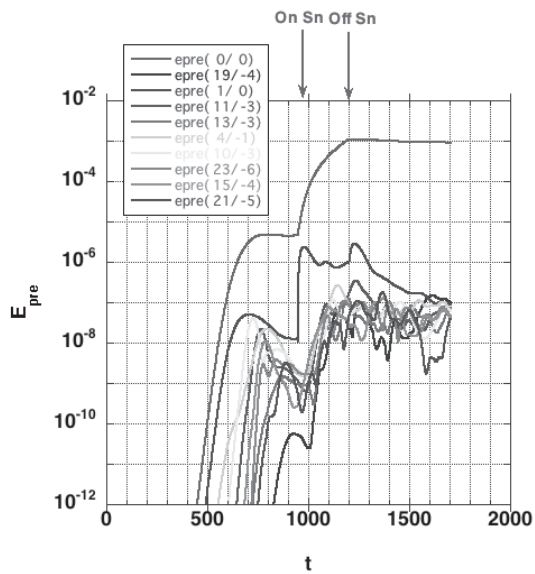


図 1

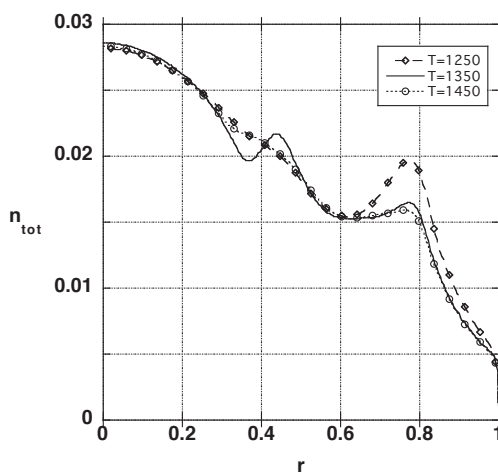


図 2

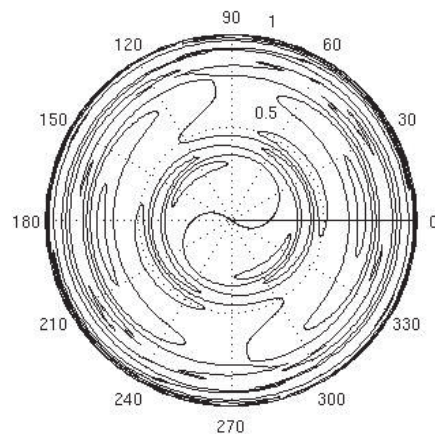


図 3

を示す。シミュレーションにおいては、t=1200 で密度ソースを切ったが、その後しばらくは周辺で密度が上昇し、t=1250 を境に周辺密度は急激に減少する。t=1350 において r=0.4 付近に非局所輸送が発生しているのがわかる(実線)。t=1350 で卓越しているモードを調べた結果、(m=1, n=0)モード(m:ポロイダルモード数、n:トロイダルモード数)が渦巻き状の揺らぎ構造を形成することが判明した。図 3 に t=1350 での(1,0)モードのみから構成される密度揺らぎの等高線(z=0)を示す。(1,0)モードが非局所輸送の担い手と考えられ、2次元の渦巻き構造がプラズマのコア領域と周辺領域を

連結することを発見した。今後は(1,0)モードの励起機構を解析する予定である。

- [1] S. Inagaki, et al., Phys. Rev. Lett. **107** 115001(2011), [2] N. Tamura, et al., Phys. Plasmas **12** 110705(2005), [3] T. Iwasaki, et al., J. Phys. Soc. Jpn. **68** 478(1999), [4] G. Dif-Pradalier, et al., Phys. Rev. E **82** 025401(2010), [5] M. Yagi, et al., Nucl. Fusion **45** 900(2005).

#### 研究組織

矢木雅敏(原子力機構)、西村征也(核融合研)、杉田暁(中部大学)、徳永晋介(RIST)

## 核融合炉の中性子照射環境に対応した高熱流束機器用タングステン材料の高熱流束負荷下の挙動

東北大学大学院工学研究科 長谷川 晃

### I. 目的

将来の核融合炉では、第一壁・ブランケットやダーバータの冷却管のアーマ材として、熱及びスパッタリング特性に優れたタングステン(W)を使用する計画が進められている。このタングステ材は、プラズマからの熱・プラズマ粒子負荷を受けると共に、核融合反応で発生した中性子の照射を受け、照射損傷による脆化等が発生する。我々は、中性子照射特性を考慮した高熱流束機器用タングステン合金を開発することを目的として、これまで実験室規模で作製されたW材料を用いて、中性子照射やその後の評価によって得られた成果を基に、核融合炉の使用環境により適した新しい合金を設計し、さらに耐照射性の向上が予測される熱・機械的処理を行い、各種の評価用の試料を作製すると共に、作製した試料の評価を進めている。本研究では、高熱流束機器材料に求められる諸特性の内、高熱負荷特性、熱疲労等の特性を評価し、材料開発のための基礎データを取得することを目的とする

### II. 実験方法

実験には ITER grade W (IG-W(a)) 及びこの再結晶材 (IG-W(b)) を使用した。また、1500°C で 1 時間保持することにより再結晶化させた K doped W と W-1wt%La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> についても実験を行い比較した。K doped W は、製造過程の熱処理により K が揮発しバブルを形成し、これにより分散したバブルが粒界や転位の動きを阻害し高温強度が向上する。また、W-1wt%La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> は La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 粒子を分散させることで、粒界すべりが抑制されると共に組織が安定し、高温強度が向上している。

本実験では、九州大学応用力学研究所の電子ビーム熱負荷実験装置を使用し、熱源として電子ビームを用いた。今回用いた試料サイズは 10mm x 10 mm x 1mm で、実験前に電解研磨を行った。試料は Cu 製の強制水冷却を行っている試験台に 5mm φ の孔が開いた W 製の押さえ板で機械的に固定した。試料の表面温度は、二色放射温度計を用いて測定した。電子ビームの加速電圧は 20kV でビームサイズの径は約 3mm φ で、2 秒間の照射で試料表面が 1300°C 程度に達するようパワーを調節した。2 秒間のビーム照射の後、冷却時間として 7.5 秒間保持することで、1 サイクル 9.5 秒とした。このようなサイクルを、各試料に対し計 200 回繰り返した。また、損傷過程を確認するため適宜取り出し、走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いて表面観察を行った。

### III. 主な結果および考察

ビーム電流を調節することで最高到達温度が約 1300°C の繰り返し熱負荷を与えることができた。表面温度は照射から 2 秒後に最高温度に達し、照射終了と共に下降し、表面温度は定常状態になることはなかった。

図1には、それぞれの試料について照射実験後試料を取り出し表面観察を行った SEM 像を示した。熱負荷を 20 回繰り返すと、各試料で変形が生じた。IG-W(a)では転位の移動により生じたすべり線が確認できた。これは、温度が上昇し降伏応力が低下することにより、熱応力により塑性変形が起こり、これにより表面にすべり線が発生し粗面化したものと考えられる。熱応力計算では、ビーム照射部分では、加熱中に圧縮応力、冷却中に引っ張り応力が働くことがわかった。一方、IG-W(b)では IG-W(a)よりも、表面は粗面化しており、結晶粒内は多くのすべり線が見られ、結晶粒界においても凹凸が生じている。これは、IG-W(b)は再結晶材であるため、IG-W(a)と比較し柔らかいため粒内の表面形状変化が大きいものと考えられる。また、再結晶により粒界が弱くなっており、

このため、粒界における変形も大きいものと考えられる。

K doped W では結晶粒界の損傷は IG-W(b)と同程度見られたが、粒界内のすべり線は少なかった。一方、W-1wt%La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> では、他の試料と同様な損傷が発生しているが、損傷範囲は狭い領域に限られている。

70 サイクル後は、W-1wt%La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> では損傷範囲が拡大し、また、La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の粒子が欠損し、孔となっている個所が多く発生していた。さらに、すべり線が見られた箇所や La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> が欠損した箇所に亀裂が生じていた。これは W-1wt%La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> では繰り返し熱負荷により La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の粒子が欠損したのと考えられ、さらに繰り返し熱負荷が進み応力集中などが発生し亀裂が拡大していったものと考えられる。従って、繰り返し熱負荷についての耐性は少ないことも予想される。200 サイクル後では、IG-W(a)、IG-W(b)では損傷が急激に進み、表面の凹凸は激しくなり、結晶粒内、結晶粒界に亀裂が発生していた。また、W-1wt%La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> では 70 サイクル後に確認された亀裂が進展し、剥離が発生している箇所が見られた。しかし、K doped W では合計 200 サイクルの熱負荷をかけても亀裂や剥離などは発生しなかった。

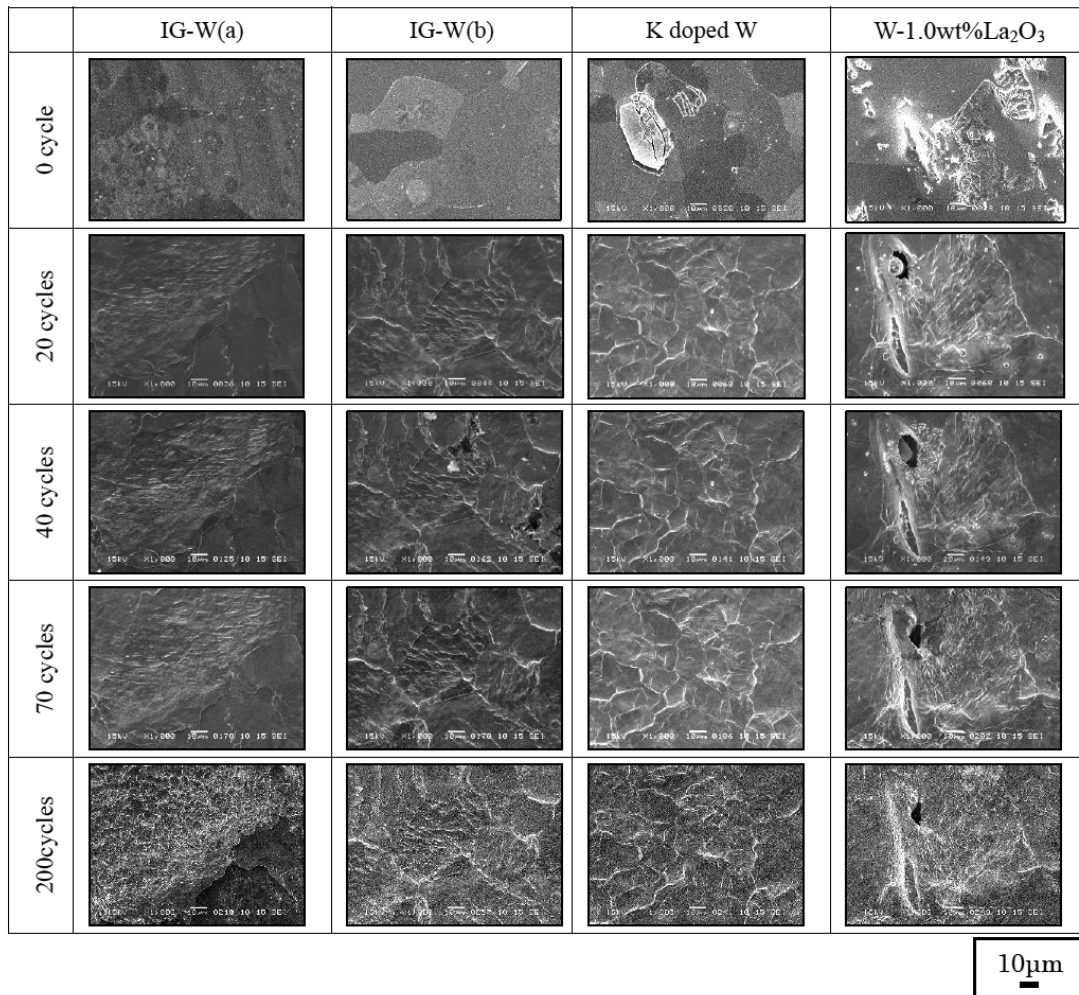


図 1 繰り返し熱負荷実験後の試料表面の SEM 像

#### IV. まとめ

各種 W 材に対して、電子ビーム熱負荷装置を用いて熱負荷実験を行った。非定常熱負荷の繰り返しにより W 材表面には粗面化等の損傷が進行する。電子ビーム照射中の圧縮応力と照射後の引張応力が繰り返し生じ、繰り返し熱負荷の回数が増加すると熱疲労による損傷が進むものと考えられる。

### 九州大学・応用力学研究所 炉内構造物の経年変化に関する研究集会

研究代表者 京都大学原子炉実験所 義家敏正  
研究協力者 九州大学応用力学研究所 渡邊英雄

#### 1. はじめに

加速器を含めて原子力材料の特徴は、放射線場で使われることである。特にエネルギーの高い量子ビームの照射は材料に多様な変化を引き起こす。ビームによりエネルギーが付与された領域は、短時間で局所的にはエネルギー最小の状態になるが、材料全体としては非平衡状態である。原子力材料の構造変化は、多くの場合原子の弾き出しによって引き起こされる。従って必然的に点欠陥過程を含む。点欠陥過程は熱活性化過程であるので、照射温度、損傷速度、材料中の既存欠陥、形状等の影響を受ける。原子炉であれ核融合炉であれ、炉内構造物はこのような状態に長期間曝される。そのための経年変化の解明は重要である。一昨年の福島原発事故以降、中性子照射脆化による鉄系構造材料の劣化が新聞等で大きく報道されており、劣化プロセスの社会的な関心も高い。従って本研究集会では、炉内構造物の経年変化の解明を中心とし、現在までの知見を集約することを目的とした。このような知見は将来の核融合炉設計にも寄与すると期待される。

中性子照射環境下における材料研究会は、平成 20, 21 年度に応用力学研究所・研究集会とし開催され非常に好評であった。特に平成 21 年 7 月 9-10 日において実施された研究会では、学外 29 名、学内 10 名の参加者を集め開催された。発表論文数 19 件であり、実験から理論・計算、更に動力炉の現場での高経年化対策まで幅広い内容で、2 日間に亘り活発な発表と意見交換がなされた。本年度の研究会はこれを引き継ぐものである。この研究集会で発表・討論された内容は、照射損傷一般に当てはまる現象であり、原子炉材料だけでなく、核融合炉材料や他の照射効果が問題となる材料、例えば核破砕中性子源のターゲット材料の開発にも貢献することが期待される。

#### 2. 研究集会概要

今回の研究集会は平成 24 年 7 月 24 日、25 日に亘って開催された。参加者は学外 15 人、学内 36 人である。両日で 17 件の研究発表があり、活発な質疑応答や意見の交換がなされた。理論・計算から実験、さらに実機の現場での高経年化対策まで幅広い内容であった。大学院生も含めた若い研究者の参加が多いことが特色であった。また石野栞東京大学名誉教授、小岩昌宏京都大学名誉教授及び井野博満東京大学名誉教授の参加と発表があった。若い研究者たちが、定年後も引き続いて活発な研究活動をしているこれら大家の方々と交流する機会を持てたことは、大きな刺激になったと思われる。

#### 3. 講演概要

##### 3.1 圧力容器照射脆化関連 (1)

原子炉圧力容器鋼は原子炉の重要な構造物であり、その脆化が原子炉の事実上の寿命を決定する。このセクションでは石野栞東京大学名誉教授の座長で、まず義家敏正京都大学原子炉実験所教授から本研究集会の申請者として挨拶があった。引き続いて 5 件の講演があった。最初の講演は渡邊英雄九州大学准教授で、「玄海原発 1 号炉照射脆化に関するこれまでの経緯と九大での取り組み」というタイトルで

発表がなされた。最近の九州電力玄海原発1号炉の高経年化を巡る経緯、原子炉内監視試験片のDBTTの上昇にも関わらず、材料の照射欠陥構造からは上昇を示唆する結果が得られていないという重要な問題点が指摘された。同准教授は保安院の意見聴取会のメンバーであり、非常にインパクトのある講演であった。発表の最後に現象の詳細な理解のためのスキームが提示された。次に井野博満東京大学名誉教授と小岩昌宏京都大学名誉教授により「玄海原発1号炉压力容器の照射脆化および現行予測式についての考察」という講演がなされた。井野教授は玄海原発1号炉の問題点を渡邊准教授とは異なる視点から述べた。小岩教授からは予測式が機構論に基づいていないとの厳しい指摘が行われた。引き続いて永井康介東北大学金属材料研究所教授により「3次元アトムプローブ及び陽電子消滅によるフィンランド Loviisa 炉監視試験片のナノ組織解析」という講演がなされた。国内監視試験片は大学では扱えないため、外国のフィンランドのVVER-440炉の監視試験片を用いた貴重なデータの紹介があった。義家敏正京都大学原子炉実験所教授により「照射下における原子炉压力容器鋼の点欠陥挙動に関する考察」という講演がなされた。内容のない発表でありあまり興味が持たれなかった。鳴井実東北大学金属材料研究所研究員により「大学における研究炉を用いた材料照射と今後の予定」という講演がなされた。東北大学金属材料研究所量子エネルギー材料科学国際研究センターにおける過去の原子炉照射装置改良の歴史と実績及び今後の開発研究についての講演であった。

### 3.2 機械的特性と照射損傷基礎

I N S S 福谷耕司研究員の座長で3件の講演がなされた。青野雄太九州大学工学研究院准教授により「PTS評価におけるき裂深さの影響について」という講演がなされた。脆化による破壊を評価するための破壊靱性値と応力拡大係数についての計算と玄海1号炉への応用が話された。材料照射効果の専門家があまり知らない事柄であり、参加者全員がその重要性を認識した。森下和功京都大学エネルギー理工学研究所准教により「燃料被覆管材料の酸化プロセスのモデル化」という講演がなされた。燃料被覆管酸化メカニズムを理解するために、第一原理計算によってZr酸化膜中の酸素拡散過程を理論的に評価したものであり、原子炉の安全性に関連する重要な内容であった。石野葉東京大学名誉教授により「衝突カスケードのMD計算における電子的エネルギー損失の影響」という講演がなされた。従来考慮がなされていない電子的エネルギー損失の重要性を提示し、今後のMD計算の方向を示したものである。

### 3.3 照射損傷基礎と压力容器照射脆化関連（2）

永井康介東北大学金属材料研究所教授の座長で4件の講演がなされた。大澤一人九州大学応用力学研究所助教により「BCC金属中の水素と空孔濃度の熱力学計算」という講演がなされた。今まで核融合材料として重要なタングステン空孔に捕獲される水素の個数を第一原理で計算していたが、タングステン以外のBCC金属も同じような計算をすることで全体像が却って分かるようになったことが示された。岡弘北大工学研究科大学院生により「重照射した改良SUS316鋼における微細組織と機械強度の相関」についての講演がなされた。中性子照射データの豊富な改良SUS316鋼（PNC316鋼）を対象に、照射挙動のモデル化のための微細組織と機械強度のミクロマクロ相関評価を研究したものである。村上健太東京大学大学院助教により「照射欠陥の移動と集合に対する溶質原子の影響」という講演がなされ、2つの課題、銅を含まずニッケルとマンガンを含む溶質原子クラスタが、溶質原子のどのような形態の移動によるものかを明らかにすることと、溶質原子クラスタの発達において、シリコンの効果を明らかにすることについて発表された。Kai Lu福井大学工学研究科院生により「Prediction of lower bound fracture

toughness in the transition temperature region by T33-stress」というタイトルで、TSTのための  $J_c$  の予想についてFEAを用いた計算結果が講演された

### 3.4 圧力容器照射脆化関連 (3)

義家敏正京都大学原子炉実験所教授が座長として5件の講演がなされた。藤井克彦原子力安全システム研究所研究員により「Cu クラスタ形成に対する応力下照射の影響」という講演がなされた。原子炉容器鋼の照射脆化に対する外部応力の影響とそのメカニズムを解明し、照射脆化予測の高度化に資するために、Fe-Cu モデル合金に対して単軸引張応力下でイオン照射を行い、Cu クラスタ形成に対する応力の影響を3次元アトムプローブでマイクロ組織を観察し、クラスタ形成による照射硬化に対する応力影響の基礎課程を検討したものである。笠田竜太京都大学エネルギー理工学研究所准教授により「イオン照射材のナノインデンテーション硬さ」という講演がなされた。イオン照射材の強度特性評価にはナノインデンテーション法の適応が重要であるが、イオン照射材のナノインデンテーション硬さが意味するところは、正確には(定量的には)理解されていなかった。講演ではナノインデンテーション硬さの押し込み深さ依存性の理解が、相関則の構築のために重要であることが指摘された。鎌田康寛岩手大学工学部教授により「照射過程での純鉄・低合金鋼の磁気特性変化 - 冷間圧延した純鉄の磁性 - 」という講演がなされた。中性子照射による原子炉圧力容器鋼の磁気特性の変化(磁気ヒステリシス曲線)から照射脆化の非破壊評価の可能性を探る重要な研究である。荒瀬史朗九州大学総合理工学研究院大学院生により「圧力容器鋼における照射欠陥挙動のCu濃度依存性」という講演がなされた。IVARプログラム(UCSB)で使用されたCu含有量の異なる3種類の圧力容器鋼に温度を変えて鉄イオン照射を行い、Cu含有量の違いが照射量や照射温度にどのような変化を及ぼすのかを検討したものである。

最後に渡邊英雄九州大学応用力学研究所准教授により、今後の予定と連絡があり閉会した。以上今回の研究集会が非常に実りのあるものであったと総括できる。

## 九州大学・応用力学研究所・研究会プログラム(最終) 炉内構造物の経年変化に関する研究集会

場所 九州大学応用力学研究所 中会議室(2階)

日時 平成24年7月24日(火)13:30 p.m.~7月25日(水)12:05 p.m.

7月24日	圧力容器照射脆化関連 (1)	座長 石野 葉
13:30	13:35 義家敏正 京都大学原子炉実験所	挨拶
13:35	13:55 渡邊英雄 九州大学応用力学研究所	玄海原発1号炉照射脆化に関するこれまでの経緯と九大での取り組み
13:55	14:35 井野博満 東京大学 名誉教授	玄海原発1号炉圧力容器の照射脆化および現行予測式についての考察(40分)
	小岩昌宏 京都大学 名誉教授	
14:35	14:55 永井康介 東北大学金属材料研究所	3次元アトムプローブ及び陽電子消滅によるフィンランドLoviiisa炉監視試験片のナノ組織解析
14:55	15:15 義家敏正 京都大学原子炉実験所	照射下における原子炉圧力容器鋼の点欠陥挙動に関する考察
15:15	15:35 鳴井 実 東北大学金属材料研究所	大学における研究炉を用いた材料照射と今後の予定
15:35	15:50	<b>&lt; Coffee Break &gt;</b>
	機械的特性と照射損傷基礎	座長 福谷耕司
15:50	16:10 青野雄太 九州大学工学研究院	PTS評価におけるき裂深さの影響について
16:10	16:30 森下和功 京都大学エネルギー理工学研究所	燃料被覆管材料の酸化プロセスのモデル化
16:30	16:55 石野 葉 東京大学 名誉教授	衝突カスケードのMD計算における電子的エネルギー損失の影響(25分)
16:55	17:25	討論 (30分)
18:00	20:00	<b>懇 親 会</b>
		大学より徒歩10分程度
7月25日	照射損傷基礎と圧力容器照射脆化関連 (2)	座長 永井康介
9:00	9:20 大澤一人 九州大学応用力学研究所	BCC金属中の水素と空孔濃度の熱力学計算
9:20	9:40 岡 弘 北大工学院	重照射した改良SUS316鋼における微細組織と機械強度の相関
9:40	10:00 村上健太 東京大学大学院	照射欠陥の移動と集合に対する溶質原子の影響
10:00	10:20 Kai Lu 福井大学工学研究科	Prediction of lower bound fracture toughness in the transition temperature region by T33-stress
10:20	10:40	<b>&lt; Coffee Break &gt;</b>
	圧力容器照射脆化関連 (3)	座長 義家敏正
10:40	11:00 藤井克彦 (株)原子力安全システム研究所	Cuクラスタ形成に対する応力下照射の影響
11:00	11:20 笠田竜太 京都大学エネルギー理工学研究所	イオン照射材のナノインデンテーション硬さ
11:20	11:40 鎌田康寛 岩手大学工学部	照射過程での純鉄・低合金鋼の磁気特性変化 -冷間圧延した純鉄の磁性-
11:40	12:00 荒瀬史朗 九州大学総合理工学研究院	圧力容器鋼における 照射欠陥挙動のCu濃度依存性
12:00	12:05 渡邊英雄 九州大学応用力学研究所	今後の予定と連絡

懇親会につきましては、九大大澤さんから別途ご連絡いたします。会費は、当日受付にて徴収させていただきます。

## 24 FP-S2

### 各種磁場配位での周辺揺動研究

代表者 広島大学大学院工学研究院 西野信博

#### 目的と特徴

近年、核融合プラズマ実現の上で障害となっているプラズマの乱流状態に関する実験研究、理論研究、シミュレーションが盛んに行われている。そして、多くの磁場配位で類似の乱流現象が観測されており、乱流はプラズマと磁場との関連（あるいは、相互作用）において一般的な物理現象と認識されている。

一方、我が国の核融合研究では、種々の磁場配位の装置が稼働しており、現存する装置とその磁場配位の種類は世界一とあってよい。そこで、本研究会の目的は、日本の利点を生かし、上記多種の磁場配位の装置で実験的に観測されているエネルギー閉じ込め特性（エネルギー・粒子閉じ込め時間）の向上を阻む周辺プラズマ乱流の計測結果を統一的な視点でとらえようとする試みである。

初年度の本年は、各磁場配位の装置とその計測装置の紹介、また、最新の乱流の計測結果を発表し、参加者で議論し、乱流現象に対する理解を深めることにある。次年度では、各磁場配位における乱流の分類（あるいは、範疇わけ）を行いたいと考えている。

以下は、本年度開催した研究会の情報である。

プロシーディングスを含む詳細な資料は、応用力学研究所のHP ([http://www.triam.kyushu-u.ac.jp/QUEST\\_HP/kenkyushukai241205.html](http://www.triam.kyushu-u.ac.jp/QUEST_HP/kenkyushukai241205.html)) にパスワード付で掲載している。参加者以外で情報を得たい方は、発表資料の各担当者、もしくは、所内世話人関子秀樹教授に連絡されたい。

#### 研究会日程とプログラム

日時：平成24年12月5日（水）

会場：九州大学応用力学研究所本館2F大会議室

代表者：西野信博（広島大学大学院工学研究院、准教授）

所内世話人：関子秀樹

トピックス：各装置における周辺乱流計測結果の紹介

#### プログラム

13:00-13:05 Opening address by Nobuhiro Nishino (Hiroshima Univ.)

Chair: Nobuhiro Nishino (Hiroshima Univ.)

13:05-13:35 Statistical features of coherent structures at the plasma edge in QUEST - investigated with fast visible imaging

Santanu Banerjee (Kyushu University)

13:35-14:05 Study of intermittent features of edge plasma fluctuations after SMBI in Heliotron J

Linge Zang (Kyoto University)

14:05-14:35 ヘリオトロンJ装置において観測された高速イオン励起MHD不安定性時の周辺プラズマのレスポンス

Shunsuke Ohshima (Kyoto University)

14 : 35 – 14 : 50 (Coffee Break)

14 : 50 – 15 : 20 直線・ヘリカル装置における周辺プラズマ揺動解析

Hiroshiko Tanaka (NIFS)

15 : 20 – 15 : 40 ガンマ 10 における揺動計測と高速カメラを用いた周辺プラズマ観測

Yousuke Nakashima (University of Tsukuba)

15:40 – 15:55 高速カメラを用いた周辺プラズマ観測

Satoru Kigure (University of Tsukuba)

15 : 55 – 16 : 25 Progress towards understanding of dynamical interactions between global fields and turbulence  
nonlinear force in laboratory plasmas

Yoshihiko Nagashima (Kyushu University)

16 : 25 – 17 : 00 Closing Address by Nobuhiro Nishino (Hiroshima Univ.)

#### 参加者名簿

- 西野 信博 (広大院・工学研究院・准教授)  
中嶋 洋輔 (筑波大・数理物質系・教授)  
木暮 諭 (筑波大・数理物質科学研究科・M1)  
水内 亨 (京大・エネルギー理工学研究所・教授)  
大島 慎介 (京大・エネルギー理工学研究所・助教)  
Linge Zang (京大・エネルギー科学研究科・D3)  
笠嶋 慶純 (京大・エネルギー科学研究科・M1)  
永島 芳彦 (九大・応用力学研究所・准教授)  
田島 西夜 (九大・応用力学研究所・D3)  
Santanu Banerjee (九大・応用力学研究所・D2)  
田中 宏彦 (核融合科学研究所・助教)

#### 反省点

今回は、言語を指定しなかったため、日本語での ppt の発表があり、数人の留学生には理解しづらかったことがあげられる。次年度の研究会も申請中であるが、認められれば最低 ppt 等の資料は英語とする予定である。