平成２６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ている。例えば九州大学の PANTA 装置の乱流ドックでは超高速オシロスコープや高速カメラの導入により 1TB/day 以上のデータが生成される。このような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。相互相関は乱流の時空間構造を観測する最も基本的な手法である。本研究では相関解析による雑音成分の低減、統計精度向上、の高度化に加え、相関からは直接検出できない隠れた相関を検出する手法の開発を行う。

## サブテーマ

本特定研究では 12 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

最も大きな成果は本共同研究により開発した「波動伝搬を用いた磁力線構造観測法」により磁気面のストキャスティック化を観測し、更にストキャスティック化によりプラズマ流が強い減衰を受ける事を発見した事である。本成果を基に核融合科学研究所と九州大学との共同記者会見が行われた(居田, 稲垣)。本特定研究 3 年間の活動を代表する成果である。今年度に関しては、高速カメラ(大館)や超高速オシロスコープのビッグデータの解析が行われた。マイクロ波周波数コム反射計(徳沢)開発が進展し、ドップラーシフトの空間多点同時計測に成功した。PANTA では更に template 法(位相同期型コンディショナル平均法)を用いた密度分布の高精度計測の開発が進展している。LHD では長時間放電においてアンサンブル数を従来の 100 倍にする事で低周波の微小揺動成分の観測に初めて成功した(土屋)。新たな解析法として、プラズマ中の波動伝搬の瞬時位相により突発的磁力線構造遷移の観測を行った(居田)。新たな解析法として、ヒルベルト変換を用いた瞬時値解析法がヘリオトロン J 装置に適用され（大島）、時系列信号をネットワーク化するという従来とは大きく異なるアプローチも PANTA に適用する(谷澤)等、着実に進展している。レーザー位相面の揺らぎを検出すると言う新しい計測法の開発も開始された(秋山)。今後は、これまで開発された手法を様々なプラズマへと適用する。

## 26 特 2-1

# 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　ヘリカル研究部　居田克巳

目的

本研究は磁力線構造の観測手法の開発を行う事を目的とする。磁力線構造を可視化する事で磁気面のストキャスティック化を観測する事が可能となる。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ため、プラズマによる磁気面のストキャスティック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のは急務の課題であった。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成果をあげてきた。本手法の更なる高度化のため、多くの装置のプラズマ実験に適用する。更に、開いた磁力線構造での波動伝搬の理解のため応用力学研究所の直線装置 PANTA を用いた実験も併せて行う。

波動伝搬による磁力線構造の可視化

本研究では図 1 に示したような磁力線構造の変化を観測する事に成功した。この手法は熱の伝わり方が磁力線に沿った方向と横切る方向で $10^{3\text{-}5}$ の大きな違いがある事を基盤にしている。プラズマの中心に加熱を断続的に入射(ECH モジュレーション)する事でプラズマ中に熱波動を励起し、その熱波動の伝搬特性(時空間構造)を観測する。磁気構造が"閉じた磁気面"である場合、熱は磁力線を横切って伝搬する必要があるため、径方向の熱伝搬速度はゆっくりとしている。しかし磁気面が"ストキャスティック化"すると磁力線自身が空間的に大きく動くため、熱波動は磁力線を横切らずとも径方向に伝搬できるようになるため伝搬速度は圧倒的に速くなる。図 1 下段には熱波動が伝搬する際の遅れ時間の径方向分布を示している。磁気面がストキャスティック化している場合、熱波動は瞬時（遅れ時間~0s）に伝わる事が分かる。このように熱波動の伝搬から磁気面の状態を推定できる。

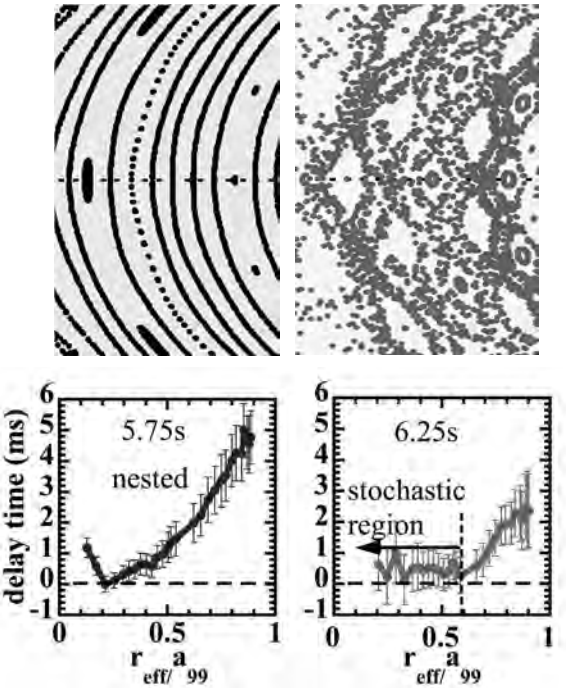



図 1 閉じ込め磁場の断面構造および熱波動の伝搬。（上段左)閉じた磁気面、(上段右）ストキャスティック化した磁気面、(下段左)閉じた磁気面での熱伝搬特性、(下段右）ストキャスティック化した磁気面での熱伝搬特性。

運動量輸送への影響の観測

可視化手法の開発は昨年度中にほぼ完了したため、今年度は、波動伝搬を用いて磁力線構造を明らかにした上で、磁力線構造が運動量輸送に与える影響を調べる研究へと発展させた。

LHD において磁気シアを制御し、磁気面をストキャスティック化させる実験を行った。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ると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 1.3 から 0.5 に減少させた。磁気シアが 0.5 程度まで減少すると磁気面がストキャスティック化している事が熱波動伝搬特性により明らかになった。この時、磁気面がストキャスティック化に伴い、

トロイダル回転速度が減衰する現象が発見された。ストキャスティック化している場合はトロイダル回転速度はほぼ 0 になってしまう。磁気面のストキャスティック化による回転速度の減少は粘性の増加として理論的に予測されてきた。しかし今回は理論予測の 5 倍以上の強い減衰が観測されており、減衰の様相は粘性の増加では説明できない事が明らかになった。

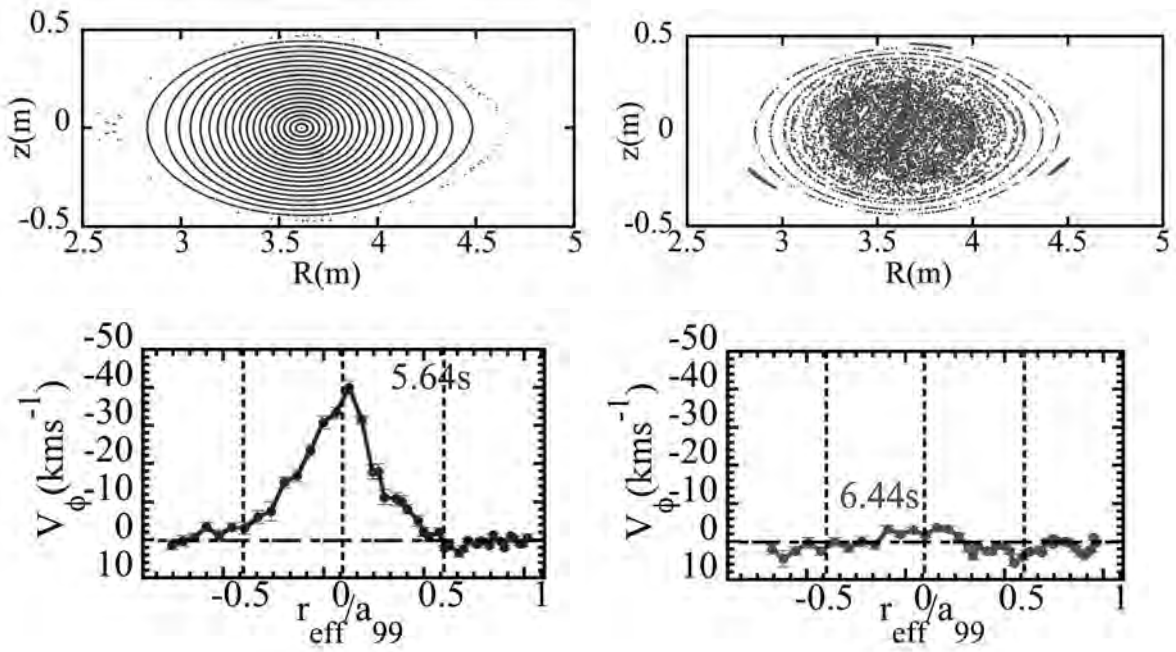



図２ ストキャスティック化の(左)前および(右)後の(上段)磁気面構造及び、(下段)トロイダル回転速度の空間分布の違い

成果の評価

磁気面のストキャスティック化とプラズマの運動量輸送との関連は非常に重要な課題であり世界的に研究が進められている。今回初めて観測されたストキャスティック化による回転の非常に強い減衰の発見は大きな成果である。本成果は Nature Communications, 6 (2015) 5816 にて発表される等国際的にも高く評価されている。本成果には本共同研究の「波動伝搬を用いた磁力線構造観測法」が磁気面のストキャスティック化の観測という重要な点を担っている。このため核融合科学研究所と九州大学との共同成果として記者会見が行われた*。本手法は LHD 以外のトロイダル磁場閉じ込め装置にも応用が可能で、今後の発展が期待される。実際に今年度は DIII-D の実験にも適用し、新たな結果を得ている。将来の核融合装置では周辺局在モードという MHD 不安定性を抑制する為に、プラズマ周辺部に摂動磁場を加えることが計画されている。摂動磁場を加えた時に磁場がストキャスティック状態になっているかどうかを実験的に調べる手段として、波動伝搬を用いた磁力線構造観測法は極めて有効な手法と考えられ、本手法の開発に成功した事は大きな意義がある。

* http://www.kyushu-u.ac.jp/pressrelease/2015/2015_01_08.pdf

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 | 核融合科学研究所 |

26 特 2-2

# 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

磁場閉じ込め核融合プラズマの研究において、乱流物理の理解は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、マイクロ波などの電磁波を用いた乱流揺動計測法が開発され各種装置に適用されるようになってきた。特に、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、ハードウエアとして開発を進めている空間同時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目的とする。

## 2. 計画と実験方法

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光源とする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。本年度は、前者の周波数コムシステムは、ka-band から U-band までの周波数領域への拡張を行い、より広い空間の情報が得られるようになった。後者の cECE 計測について以下に詳細を述べる。

## 3. 実験結果

電子熱流束の乱流揺動成分は、電子温度 $T_e$, 電子密度 $n_e$,速度 $V_r$ を用いて、

$$Q_e = \frac{3}{2} T_e \left\langle \tilde{n}_e \tilde{V}_r \right\rangle + \frac{3}{2} n_e \left\langle \tilde{T}_e \tilde{V}_r \right\rangle$$

と記述できる。したがって、密度揺らぎだけでなく温度揺動の情報も必要である。一般に高時間分解能が期待できる ECE ラジオメータ信号では、乱流に起因するような波数の高い揺動成分は、ECE の雑音成分に埋没し、検出が困難である。そこで、空間的に近接している（ただし帯域の重複の無い）2 つの空間測定位置からの ECE 信号間の相互相関を取得し、そのアンサンブル平均処理を

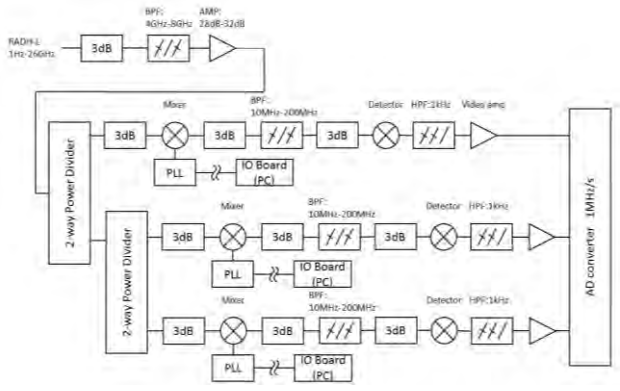



図１：cECE システム概略図

施すことにより雑音成分から電子温度乱流情報の抽出を行う cECE 法の適用を LHD にて行った。図 1 に cECE システムの概要を示す。システムは、既存の ECE ラジオメータ(RADH)の信号の一部を分岐これに周波数可変の局発波をミキシングすることにより、ECE 信号を検出する。局発波の周波数を変化させることにより、プラズマ中の任意の位置の観測を可能とする点が特長である。本年度、局発波の周波数を PLL 安定化、バンドパスフィルタの帯域の最適化などを実施し、LHD からの放射 ECE 信号の検出に成功した（図 2）。

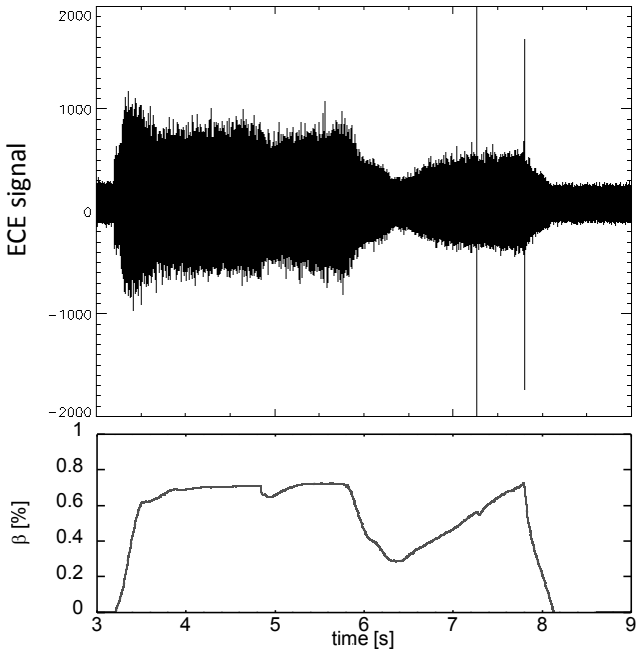



図２：cECE で計測した ECE 信号（上）とプラズマベータ値（下）の時間変化

図 1 に示すように 3ch の計測システムとしており、同時に異なる 2 点間の相関計測が可能である。図 3 には、相互相関解析で求めた cECE と対応する空間を計測している従来型のラジオメータ信号のコヒーレンスの時間変化を示す。t >5.5s より周波数的に広がったスペクトルが観測できる。また、t> 6.5s 以降では、従来のラジオメータではコヒーレンスが低くなっているが、cECE はより高周波数まで広がっている。この差は、信号の周波数帯域が cECE の方が半分で、チャンネル間の周波数がより近接していることによると考えられる。今後、平均化処理による雑音成分の低減によるより高周波数の揺動成分や多点計測による空間相関長、径方向波数観測などの諸量の抽出手法の確立を行っていく。

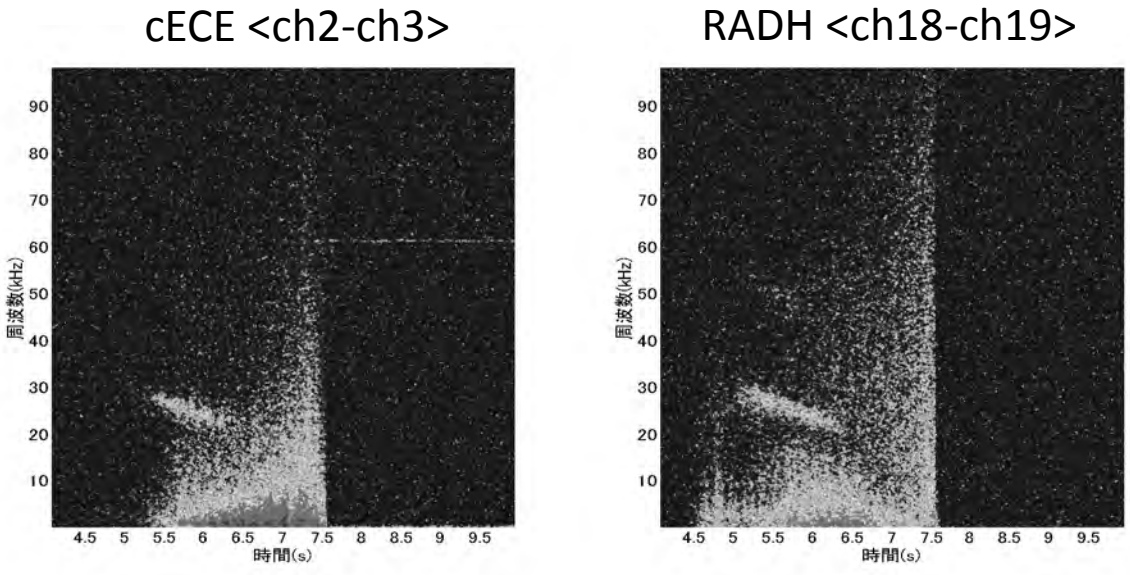



図 3： cECE により求めた 2 点間のコヒーレンスの時間変化（左）、RADH のもの（右).

# 複雑ネットワークの手法を用いた プラズマ乱流時系列データの新しい解析手法の開発

高知工業高等専門学校電気情報工学科　谷澤俊弘

## 1　研究目的

超高温のプラズマを安定して閉じ込めるためにはプラズマ中に形成されるドリフト波乱流の物理的性質を詳細に理解することが必要不可欠である。乱流は，プラズマ流体の圧力・密度・温度・電位等の物理諸量の時系列データ中における一見したところランダムな振動として観測される。近年，本研究課題代表者（谷澤俊弘）および研究協力者（中村知道・兵庫県立大学）によって，時系列データで表現されるダイナミクスを複雑ネットワークの手法を用いて視覚化し直観的に理解する新しい手法が開発された。本研究は，この手法を磁場閉じ込めプラズマ中のドリフト波乱流の大容量時系列データの解析に応用し，そこから物理的情報を抽出する全く新しい手法を開発することを目的とする。

## 2　現在までの研究結果

本研究は 2012 年に谷澤と中村によって得られた時系列データのネットワーク化手法 [1, 2, 3] を円筒形直線型プラズマ内ドリフト波乱流の観測およびシミュレーションから得られる時系列データに適用するものである。この手法は，時刻 $t$ における時系列データ $x(t)$ をその時刻以前のいくつかのデータ $x(t-1)$, $x(t-2)$, ... とランダムノイズ $\varepsilon(t)$ を用いて

$$x(t) = a_0 + a_1 x(t-l_1) + a_2 x(t-l_2) + \ldots + a_w x(t-l_w) + \varepsilon(t) \tag{1}$$

と線形モデル化し，各時間項 $x(t)$, $x(t-l_1), \ldots, x(t-l_w)$ を表わすネットワークノードにおいて，各時間遅れ項から時刻 $t$ の項 $x(t)$ へ向う連結線を引くことにより，有向ネットワークとして表現する。ここで，パラメータ $a_0, a_1, \ldots, a_w$ は実際に観測された時系列データと線形モデルによって生成されるデータ間の誤差の二乗平均を最小にするように決められる。この線形モデルの一種である Reduced Auto-Regressive Model (RAR) は，モデルの最適化基準として，さらに情報量基準（information criterion）を合わせて用いることにより，いくつかの時間遅れ項 $x(t-l_1)$, $x(t-l_2), \ldots, x(t-l_w)$ から最適な部分集合を選び出す。この手法においては，振動の定性的な違いがネットワークトポロジーの違いとして明確に表現されるという利点がある。

図 1 に，円筒形直線型プラズマ内ドリフト波乱流の 64 チャンネルの測定から得られた時系列データのうちの一つ（チャンネル 16）を本研究の手法によりネットワーク化したものを示す。

RAR モデリングは多変数の時系列データにも用いることができ，このネットワークを用いた可視化法は多次元の時系列データ解析にも有効であることがわかっている [4]。

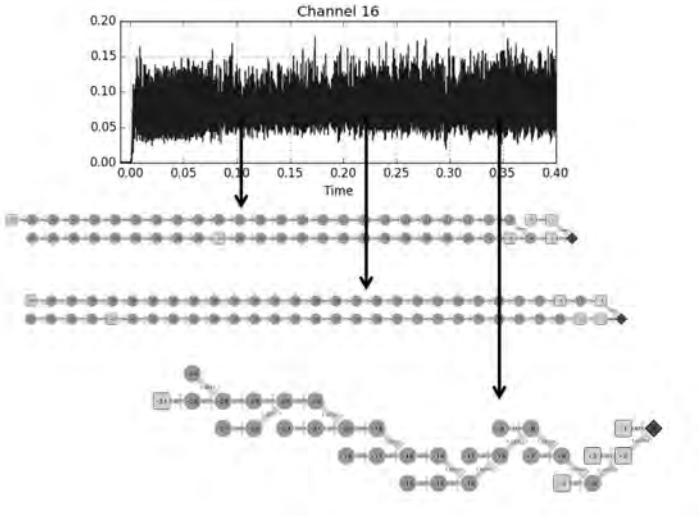



図 1　円筒形直線型プラズマ内ドリフト波乱流 64 チャンネルの測定データのうちの一つのチャンネル（チャンネル 16）の時系列データを谷澤・中村の手法によりネットワークとして視覚化したもの。時間経過に伴う振動の性質の違いがネットワークトポロジーの違いとして明確に表現されている。

## 3　今後の研究の方向について

今後，さまざまな状況下におけるドリフト波乱流の観測および数値シミュレーションデータをこの手法によりネットワークとして視覚化し，データが表現する物理とネットワークトポロジーとの対応関係を解析していく予定である。また，さらに各チャンネル間の関係性やプラズマ乱流の非局所的相関関係についても，多次元時系列解析の手法等も用い，解明していきたい。

## 4　研究成果発表

現在のところなし。

## 参考文献

[1] Tomomichi Nakamura and Toshihiro Tanizawa: “Networks with time structure from time series,” Physica A, Vol. 391, pp.4704-4710 (2012).

[2] Toshihiro Tanizawa and Tomomichi Nakamura: “Complex network from time series,” the Proceedings of 2011 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA2011), Kobe, Japan, Sep 4-7, 2011, pp.690–692 (2011).

[3]「時系列データの持つ構造の推定方法及び装置，記録媒体ならびにプログラム」，発明者：中村知道，谷澤俊弘，桜田一洋，特許出願番号：2011-144894 (2011).

[4] David M. Walker, Antoinette Tordesillas, Tomomichi Nakamura, and Toshihiro Tanizawa: “Directed network topologies of smart grain sensors,” Physical Review E, Vol. 87, 032203 (2013).

# 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　ヘリカル研究部　田村直樹

## 目的

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することで、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することに成功した。これを受けて、本研究では、同評価手法において取り扱う実験データに対して雑音成分の低減技術や統計精度向上技術などを適用し、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を目的としている。

## 研究方法

本研究で行っている確率論的手法による磁場閉じ込め高温プラズマ中の電子熱輸送の状態評価では、その過程で「時間」に関する情報が失われてしまう。しかしながら、熱輸送の状態の、特にその安定性を議論しようとした時、その状態を決定づけている時間スケールを知ることは非常に重要である。また、最近の磁場閉じ込め高温プラズマに関する研究において、一つの事象に対して複数の時間スケールが観測されている例があり、事象に対して特徴的な時間スケールは自明ではない可能性がある。昨年度に引き続き、電子熱輸送の状態評価で取り扱っている実験データ中に現れる特徴的な時間スケールなどについて考察を行った。

## 研究結果

核融合科学研究所の大型ヘリカル装置（LHD）において、トレーサー内蔵固体ペレット（TESPEL）入射により非局所輸送現象（周辺電子温度の瞬間的低下に対応した即時的な中心電子温度の上昇）が発現した場合における TESPEL 入射時刻を基準とした変動電子温度勾配の時間発展の空間分布を図1の上段に示す。図1の下段は、規格化小半径位置$\rho$ = 0.12, 0.41, 0.61 それぞれにおける TESPEL 入射時刻を基準とした変動電子温度の時間発展である。図1下段に示した通り、LHD で観測されている非局所輸送現象は、プラズマの電子密度が増加するとともに消失する。図1上段より、TESPEL がプラズマに侵入した直後、プラズマ周辺部の広い領域（$\rho > 0.62$）に亘って電子温度勾配が瞬間的に増加していることが分かる。この時、TESPEL の侵入範囲は、図で示した範囲よりも外側（$\rho > 0.8$）である。その後、これを発端として、プラズマ中心部にまで電子温度勾配の変化フロントが伝播している。図1中の斜破線で示したように、比較的低密度の $n_{e_bar} = 0.7 \times 10^{19}$ m$^{-3}$ の場合は、プラズマ中心部（$\rho < 0.65$）全域において電子温度勾配の変化フロントの弾道的伝搬が確認できる。その一方で、電子密度が増加すると、例えば $n_{e_bar} = 0.9 \times 10^{19}$ m$^{-3}$ の場合、より内側の$\rho < 0.25$ の範囲において、電子温度勾配の変化フロントの位相が反転していることが分かる。図1上段右側より、この位相反転の範囲は、電子密度がさらに増加すると、さらに拡がることが分かる。昨年度の解析により、この時非常に広い領域（$\rho < 0.65$）における電子熱流束が既に変化を開始している点から、図1上段に示されている電子温度勾配の変化フロントの伝搬は、非局所輸送現象の直接的原因ではなく副次的なものであることが分かっている。した

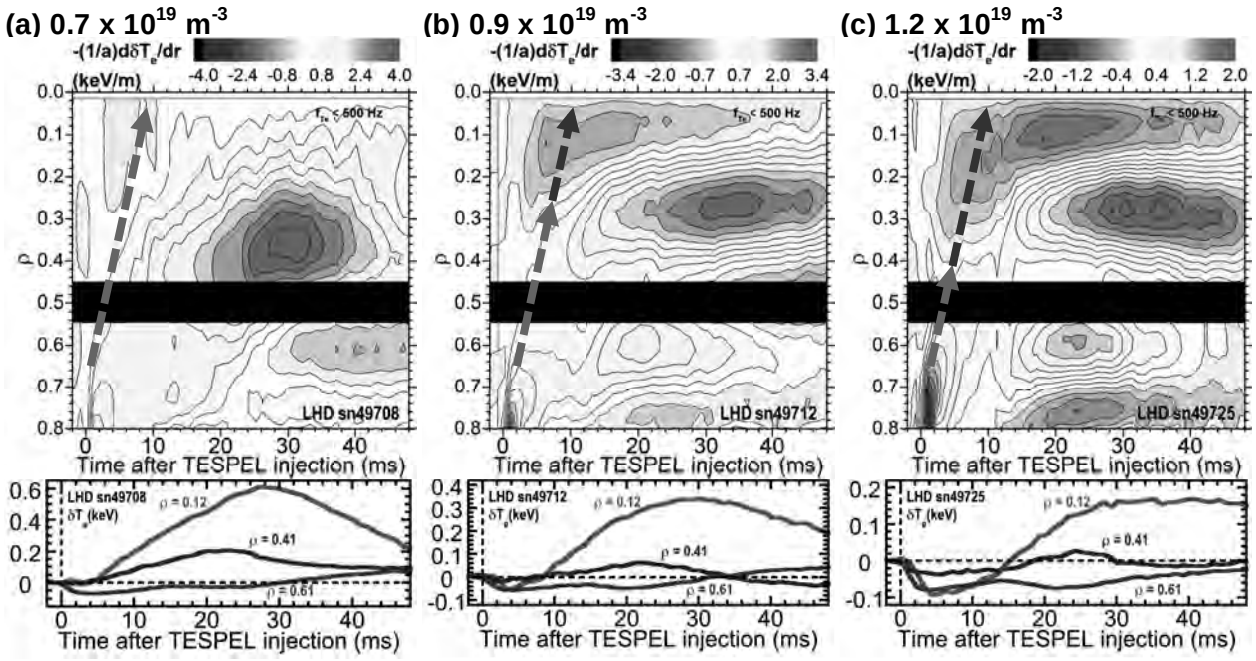



図1. LHD においてトレーサー内蔵固体ペレット(TESPEL)入射により非局所輸送現象が発現した場合における変動電子温度勾配の時間発展の空間分布(上段)と各規格化小半径位置における変動電子温度の時間発展。(a)$n_{e_bar}$ = 0.7 x $10^{19}$ $m^{-3}$, (b) $n_{e_bar}$ = 0.9 x $10^{19}$ $m^{-3}$, (c) $n_{e_bar}$ = 1.2 x $10^{19}$ $m^{-3}$。

がって、この位相反転の結果は、非局所輸送現象の直接的原因であると考えられている長い相関長を持つ揺動との非局所相互作用が電子温度勾配の変化フロントの伝搬に影響を及ぼしていることを示唆している。

## 今後の予定

磁場閉じ込めトロイダルプラズマ中の電子乱流熱輸送における非局所性について包括的理解を得ることを目的として、本研究で培ってきたデータ解析手法などをヘリカルプラズマのみならず、トカマクプラズマで得られた実験データにも適用する予定である。

## 研究成果報告

ここで示した解析結果を以下の学会で発表した。

N. Tamura, K. Ida, S. Inagaki, T. Tokuzawa, H. Tsuchiya, K. Itoh, K. Tanaka, T. Shimozuma, S. Kubo, Y. Nagayama, S. Sudo, H. Yamada, Y. Takeiri and LHD Experiment Group, "*Ballistic Propagation of the Change Front of the Electron Temperature Gradient in the Nonlocal Electron Heat Transport Event on LHD*", 4th Asia Pacific Transport Working Group International Conference, (June 10-13, 2014, Kyushu Univ., Fukuoka, Japan)

## 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)、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)

# デジタルコリレーションＥＣＥの開発とプラズマ実験への適応

核融合科学研究所　土屋　隼人

## １．背景

プラズマ研究の中でも乱流構造に関する実験研究に要求される計測には同時に高いレベルの時間分解能と空間分解能が求められる。磁化プラズマにおいて、電子サイクロトロン放射（ＥＣＥ）計測はプラズマを乱さず局所計測ができる有用な計測手法であるが、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る。近年、ノイズ低減の手法としてコリレーションＥＣＥ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ハードウェア的な複雑さが増す割には解析の柔軟性には乏しい。そこで、単一チャンネルでかつノイズを数値的に除去できるデジタルコリレーションＥＣＥを提案している[1]。一昨年度より、応用力学研究所との協力により本計測を大型ヘリカル装置(LHD)に導入し実データの取得を行っている。昨年度までに ECE を本計測にて測定できることは確認されたが、本来の目的である電子温度揺動は未だ検波されていない。そこで、本年度はプラズマが不安定になりやすい電子温度がより高い領域での実験を行った。

## ２．デジタルコリレーションＥＣＥの解析手法

近年の電子デバイスの進展に伴う ADC(analog Dijital Converter)を有するデータ収集装置の高速化が目覚ましく、ギガヘルツもしくは数十ギガヘルツの帯域をもつ機器も開発されてきた。プラズマより発する ECE の周波数帯は実験磁場に依存するが、ヘテロダイン検波を行った中間周波数帯（ＩＦ：intermidiate frequency）は通常ギガヘルツ帯であるので、直接 IF をデジタイジングすることが可能になった。そこで、IF デジタイジングされたデジタルデータより数値解析的に空間的に分離した電子温度揺動を算出した上で、温度揺動のコリレーション解析を行う手法を本研究で「デジタルコリレーションＥＣＥ」（DCECE）として提案している。

図１は解析手順を示すブロック図である。従来型マルチチャンネル型ラジオメーターでアナログ的に行われることを図１の上段の部分で数値解析的に再現される。この際、x(t)の時間窓の幅を任意に選択することができるので、電子温度時間発展 Te の時間分解能を任意に選択

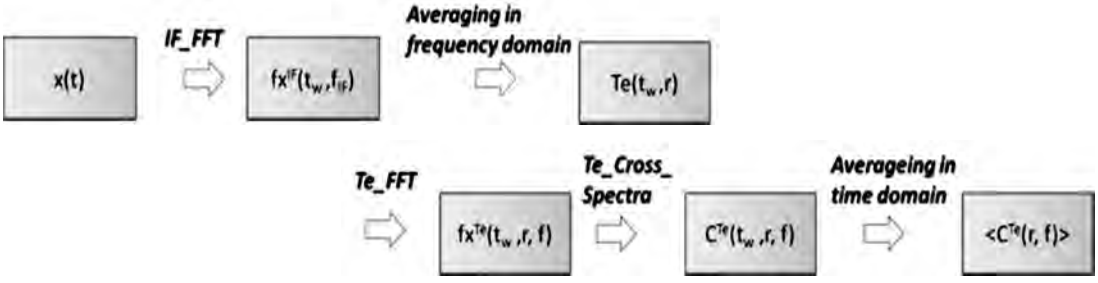



**図 1 DCECE 解析ブロックダイアグラム. IF 信号 x(t),IF のスペクトラム $fx_{IF}(t_w,f_{IF})$,電子温度時間発展 $T_e(t_w,r)$,電子温度揺動クロススペクトル $C^{Te}(t_w,r,f)$. tw は x(t)を分割した時間窓を示す。**

することができる。また、IF 周波数はプラズマ中の磁場強度に依存するため、fxIF を周波数領域に任意の数に区切り、その区間のスペクトルをそれぞれ平均すると、ある空間領域の温度とすることができる。周波数領域の区間は任意であるので、従来の計測より空間分解能を挙げることも容易である。電子温度時間発展に変換した後は、地点間の相関をとるなど従来より使われている解析手法が適応できる。このように、IF 信号を取得することで、時間分解能と空間分解能の選択が解析する段階で任意に選べることが利点である。

## ３．ECE 実データ取得と比較

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、１３４－１５０ＧＨｚのＥＣＥ信号を１３２ＧＨｚの局部発振器を用いてダウンコンバートしたＩＦ信号を高速デジタイザー（LabMaster 10-36Zi, teledyne lecroy 社製,サンプリングレート 10GHz, データ取得時間 51msec）にて取得することができた。ECE 強度は電子温度に比例するため、同装置では最も高い温度領域をもつプラズマを計測対象とした。この条件では、急峻な圧力勾配の為に数キロヘルツの MHD 揺動の発生がしばしば観測されている実験領域である。同時に、従来型のマルチチャンネル型のラジオメーターでも同 ECE 信号を観測し、比較ができた。今年度の本計測で初めて、5kHz 程度の優位な電子温度揺動が観測できた。図２は従来型 ECE 計測のコヒーレンス空間分布に DCECE の測定結果を重ねたものである。従来型より空間分解能が６倍向上させた状態でも従来型と同様の揺動を観測できていることが分かる。また、従来型と比較して周波数ピークがシャープに計測できた。空間分解能を変化させるとピークの半値幅が変化することが分かった。これは、IF 信号が離散データであることからフーリエ変換を行った時の離散化誤差の影響の影響の為と考えており、適応可能な解析パラメータの検討が必要であることが分かった。

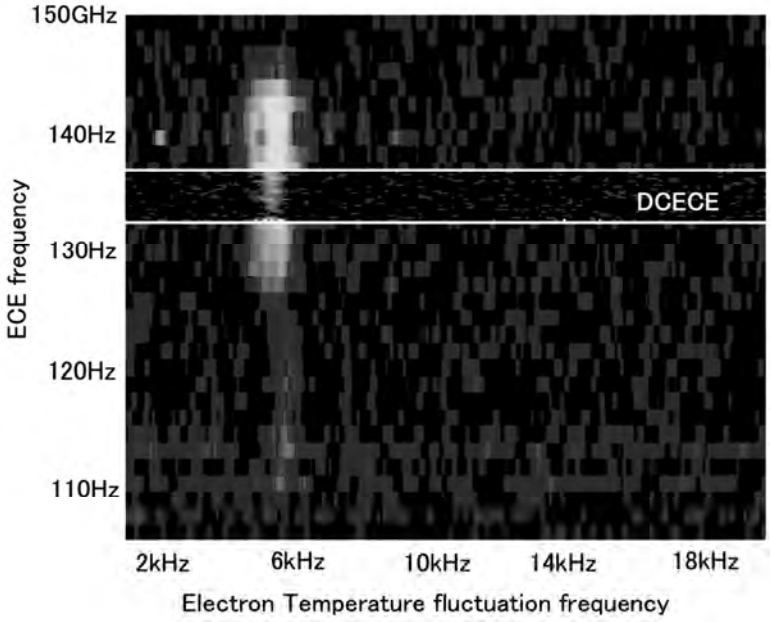



**図 2　温度揺動コヒーレンス空間分布.横軸は温度揺動周波数.縦軸は ECE 周波数,高周波側がプラズマ中心側,DCECE は 132.5～137GHz の領域を測定した。**

参考文献

[1] Hayato TSUCHIYA, Sigeru INAGAKI[1,2], Tokihiko TOKUZAWA, Naoki TAMURA and Yoshio NAGAYAMA, Plasma and Fusion Research Volume 9, 3402021 (2014)

# 26 特 2-6

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。最終年度となる今年度にて、これまで開発してきた手法を整理し、その適用例について総括を行う。

研究集会の開催

2015 年 2 月 27 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

今回は、従来の報告に加え、1-2 人の極小規模なグループに別れ個別にデータ解析作業会や PANTA ツアーも行った。

技術論：高速ディジタルオシロスコープによる計測結果が多く報告された。特にマイクロ波コム反射計への適用が進展し、これまでよりも格段に多くの空間点における乱流の同時観測が実現した。直線プラズマ実験装置 PANTA における高速カメラ計測もルーティン的に行われるようになった。これにより、1-10GB のデータが取得されるようになり、データハ

ンドリングを高度化する必要が出てきた。現時点ではデータ解析時間ボトルネックであるが、将来的にアルゴリズムの高度化やFPGA(ハードウェア演算)の発展によって解析時間は格段に短縮できる可能性がある。このため将来的にデータ取得装置からデータ解析装置までのデータ転送がボトルネックとなる可能性がある。巨大な生データと解析結果を保存する方法も重要になるだろう。今回の作業会ではデータ解析の高度化のため Fortran や python といったツールを使用した。

統合化：本カテゴリーにおける個別テーマは以下のように３つにカテゴリー分けする事ができる。

1. 新たなデータ解析法

·瞬時位相と瞬時振幅の検出(Hilbert 変換)

·線形モデルとネットワーク化

2. 既存解析法の適用

·磁力線可視化法による磁気面ストキャスティック化の観測

·バーストイベントの瞬時位相解析

·Template 法を用いた電子温度揺動の評価

·高速度カメラ計測データの処理

·長時間放電を用いた超多アンサンブル平均による S/N 比の向上

·eGAM の観測

·conditional 法による磁気島内輸送の分岐の観測

·電極バイアス実験への波数分解バイスペクトル解析

3. 新計測法

·先進マイクロ波周波数コム反射計の開発

·レーザー誘起蛍光法によるプラズマ乱流の観測

·ディジタル相関 ECE の開発

·レーザー位相面揺らぎ観測法の開発

議論：今回新たに提案されたレーザー位相面揺らぎ観測法に関して、これまで蓄積された知見から多くの新しいアイデアが提案され議論が行われた。新たなプラズマ中心部の乱流観測法としての期待が高まった。

26 特 2-7

# 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目指す．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 $Q_T$-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（3-4 eV）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℃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．電子温度のみの空間勾配を制御し，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（ETG モード）の違いがあるかどうかに注目する．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）モードおよびフルートモードが励起されることを観測し，さらに径方向電場による E×B シアの形成と，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．

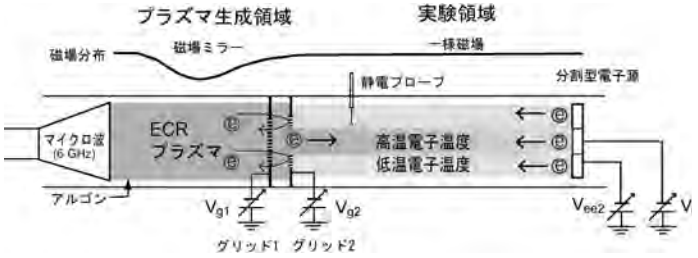



図 1: 電子温度勾配形成実験装置.

## 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（ドリフト波モード）の二つの揺動が励起され，さらに新たに約 4 kHz の低周波揺動（フルートモード）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 モード及びフルートモードの (a) $\tilde{I}_{es}/\bar{I}_{es}$ と (b) バイコヒーレン

ス $\hat{b}^2$ の電子温度勾配（$\nabla T_e$）依存性を示す［$\nabla T_e$ ＝（$T_e(r=-0.5\ \mathrm{cm}) - T_e(r=-1.5\ \mathrm{cm})$）/ 1 cm］.

これまでの成果から，$\nabla T_e$ が 1.2 eV/cm を超えるとETG モードからのエネルギー移送によってドリフト波モードが励起されることが分かっているが，さらにETG を強くすると，ドリフト波モードは $\nabla T_e$ が 1.6 eV/cm を超えると次第に飽和していくことが分かった．このとき，フルートモードの揺動強度が次第に増大しており，さらにドリフト波モードとフルートモードとのバイコヒーレンスが $\nabla T_e$ ~ 1.6 eV/cm 以上で大きくなっていることが明らかとなった．

これらの結果から, ETG のエネルギーははじめに高周波揺動である ETG モードを励起するが，非線形結合によって一度ドリフト波モードに移送され，さらにドリフト波モードとフルートモードとの非線形結合によって，フルートモードへエネルギーが移送されることが分かった．

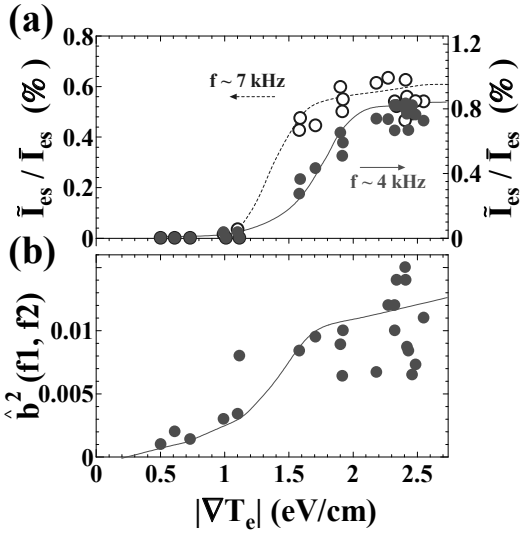



図 2: ドリフト波モード及びフルートモードにおける (a) 規格化振幅強度と (b) バイコヒーレンスの$\nabla T_e$依存性.

今後は，これらの高周波揺動と低周波揺動間のエネルギー移送の詳細を，過渡応答実験を行うことによって明らかにしていく予定である．

## 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（九州大学），伊藤 公孝，小林 達哉（核融合研）

## 5. 研究成果報告

1) [招待講演] 金子俊郎，“電子温度勾配乱流の非線形過程”，Plasma Conference 2014，朱鷺メッセ（新潟県新潟市），2014 年 11 月 18～21 日.
2) 小木曽舜，加藤雄人，下山学，文贊鎬，金子俊郎，平原聖文，“直線型磁化プラズマ装置を用いたプラズマ波動・粒子相互作用の直接観測実験”，日本地球惑星科学連合 2014 年大会，パシフィコ横浜会議センター（神奈川県横浜市），2014 年 4 月 28～5.2.
3) 小木曽舜，加藤雄人，下山学，平原聖文，文贊鎬，金子俊郎，小嶋浩嗣，“実験室プラズマにおける波動・粒子相互作用の直接観測実験”, 第 136 回地球電磁気・地球惑星圏学会総会・講演会，キッセイ文化ホール（長野県松本市），2014 年 10 月 31 日～11 月 3 日.
4) 加藤雄人，金子俊郎，文贊鎬，平原聖文，下山学，小木曽舜，“Direct measurements of wave-particle interactions in the evolution of the drift wave instability: Application of space plasma instrumentation Wave-Particle Interaction Analyzer”，Plasma Conference 2014，朱鷺メッセ（新潟県新潟市），2014 年 11 月 18～21 日.

# 二次元イメージデータからのプラズマ乱流解析技法の開発

核融合科学研究所　ヘリカル研究部　大舘暁

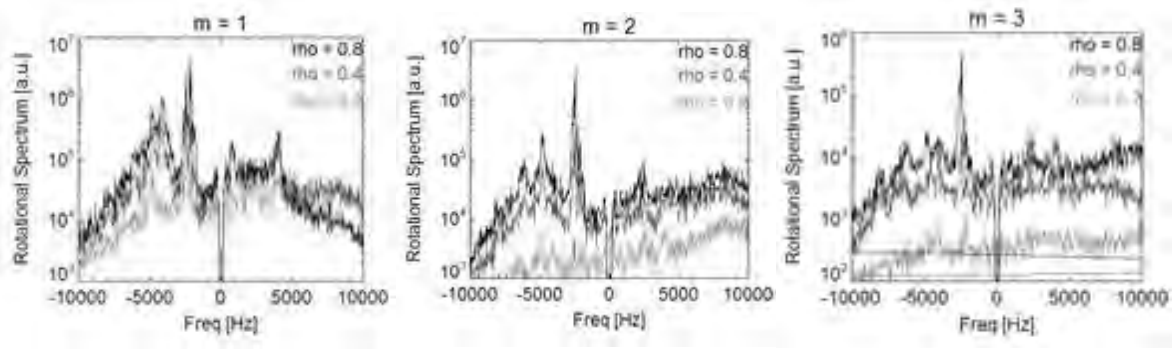
**目的**

プラズマの揺動の情報を含んだ放射イメージの解析からプラズマの揺動の性質を調べるのが本共同研究の目的であり、PANTA プラズマからの可視光の放射を高速度カメラで計測したデータを解析対象とする。本報告では 2014 年2月13日に行った実験の解析結果を主に報告する。

**実験結果**

PANTA 装置の放電部の対向面に高速度カメラを設置し、軸に平行な方向から高速度カメラによる測定を行った。揺動の典型的な周波数よりも十分速い 50kHz のフレームのデータの解析を行った。

２次元揺動データを理解するために、イメージのモード解析を行った。イメージは十分な回転対称性があることから、方位角方向にはモード数４までのフーリエ分解、径方向には１０次までのベッセル関数による展開を行い良好結果を得た。展開後、回転の位相、揺動強度の径方向分布から回転スペクトルを求めた（図１）。２～３KHz にピークを持つ支配的な揺動が見える、イオン反磁性ドリフト方向への回転を示している。これは静電プローブを使ったデータ解析でも同様の特徴を示しており、高速度カメラデータの計測が密度揺動計測として十分機能していることを示唆している。図３に画像データの時間変化を示す。m=１の回転が顕著に見える。大部分の時間は準定常的に回転しているが、時々停滞あるいは、飛躍していることがわかる(たとえば t = 200.12ms)。所々で定速の回転がディスターブされていることがわかる。この時、プラズマのコア部に周辺部とは、接続していない高い径方向モードを持った揺動パターンが観測されていることがわかった。



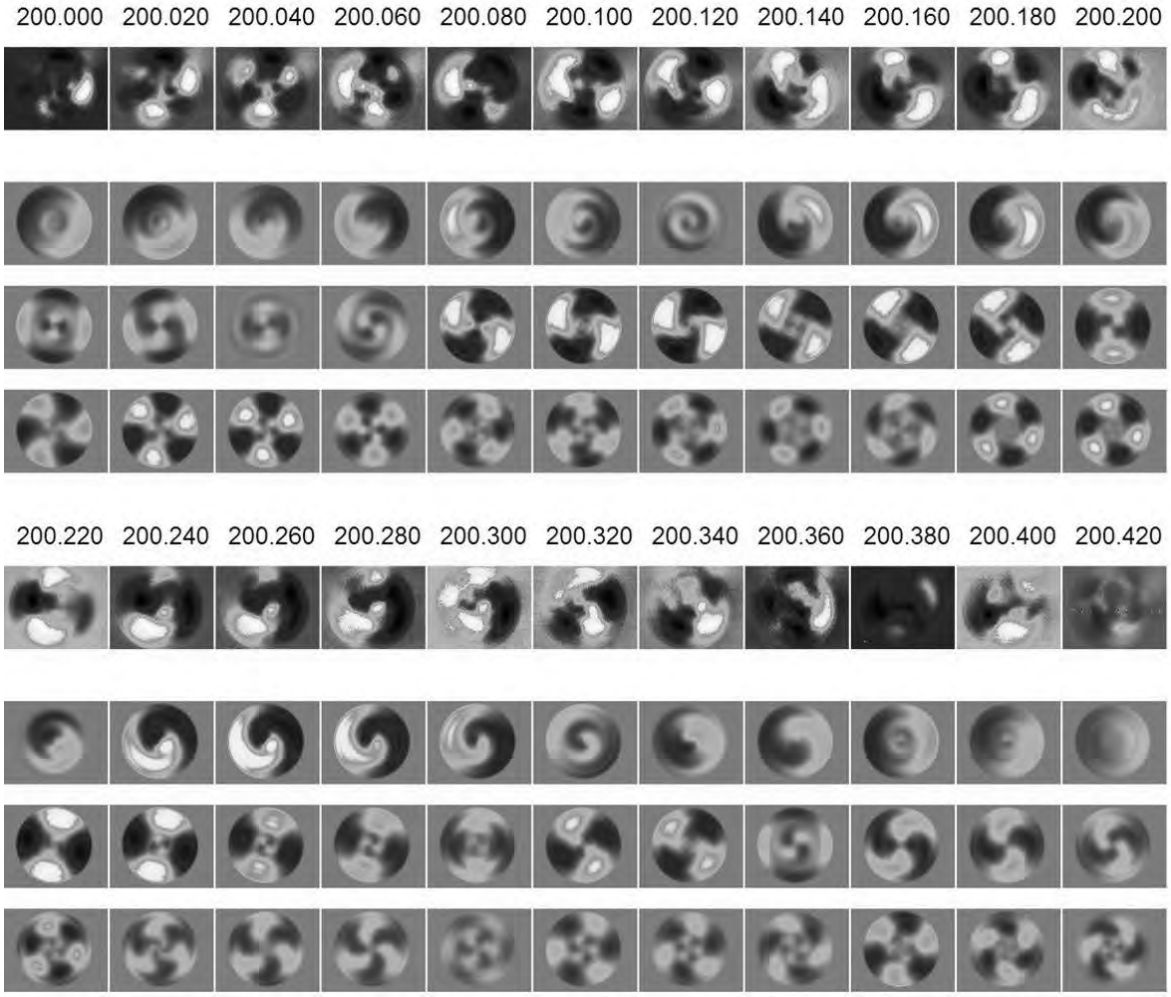



図2　揺動データの時間変化　最上段に全揺動成分、2～4段目に m=1, 2, 3 の成分をそれぞれ示す。

**今後の解析手法の開発**

これまで、モードの空間構造の検出は可動式の静電プローブによる時空間相関解析より求められていた。軸上からの高速度カメラの測定により、空間構造の同定をより直接的に行うことができることを示すことができた。各点での計測結果が同時計測であることは、時空間相関解析より優れた点であり、モード間の相互作用についてさらに解析を進めることができる。観測されているプラズマ揺動のダイナミックな挙動と、静電プローブ測定を通じて明らかになっている揺動の統計的性質がどのように結びついているかについてさらに考察を行っていきたい。

**今年度の発表**

S. Ohdachi, et. al., “A study of the fluctuations observed in the PANTA device using imaging diagnostics”, Plasma Conference, Niigata, 2014. Nov

# 26 特 2-9

## 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. 昨年度に引き続き，代表的な相関解析である Bispectral analysis について，定評のある並列化 FFT ライブラリ FFTW の利用により，処理の高速化を図った．通常の逐次処理，OpenMP による共有メモリ型並列処理，MPI による分散メモリ型並列処理のそれぞれについて，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（gcc, icc）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，FFTW による処理を行い，並列処理の評価を行った．
3. PANTA 実験装置の測定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および最適化の検討を行った．

**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 |

# トーラス装置における乱流計測の為のプローブ開発とそのデータ解析手法の検討

京都大学 エネルギー理工学研究所　大島慎介

1. 背景と目的

静電プローブは、簡便、安価でありながら高時空間分解能を有するプラズマの乱流研究において強力なツールである。九州大学が有する直線型装置 PANTA において、マルチチャンネルプローブはプラズマ乱流の時空間構造観測に用いられ、乱流の自発的構造形成の物理の解明に大きく寄与した。一方、トカマク及びヘリカル等のトー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ためには最適なプローブ設計を進める必要がある。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し、トーラス装置で適用可能な乱流研究用プローブと、データの解析手法についても検討を進めてきた

解析信号 $Z(t)$は元信号 $x(t)$のヒルベルト変換によって得ることが可能であり、複素関数 $Z(t)= r(t)\cdot\exp(i\theta(t))$とあらわすことができる。$r(t)$, $\theta(t)$はある時間での強度、位相であり瞬時振幅・瞬時位相とそれぞれ呼ばれる。この実部が実信号に相当する。また、この瞬時位相の時間微分 $d/dt(\theta(t))= \omega(t)$は瞬時周波数と呼ばれる。瞬時振幅に関しては揺動の振幅の時間変化を評価する際に一般によく使われており、例えば、帯状流の広帯域乱流への影響を評価する際などに広く活用された。解析信号によって表現することで、特に時間的にその振幅や周波数を変化するような単一周波数の信号に対して、直観的にその特徴を把握することができる。

本研究では、これまで解析信号を活用したプラズマ計測・揺動解析法を開発してきた。特に、新しく瞬時位相の差である瞬時位相差という考え方を導入し、2 信号の位相差の時間変化を高時間分解能で評価する手法を考案した。2 つの解析信号 $Z_{1,2}(t) =|Z_{1,2}(t)|\ \exp(i\theta_{1,2}(t))$ の内積をとると、$Z_1^*(t)\cdot\ Z_2(t) =|Z_1^*(t)|\cdot|Z_2(t)|\exp(i\phi(t))$であり、ここで$\phi(t)= \theta_2(t)-\theta_1(t)$が両信号の位相差、つまり瞬時位相差を評価することができる。この位相差を評価することで、例えば揺動の振幅 1 周期以内に変動する時間的な位相変化についても検出が可能となる。本手法を多チャンネルの BES 計測器と組み合わせることで、MHD 不安定性の二次元構造の可視化に成功している。さらに、位相差を評価する解析手法や計測器、例えば多チャンネルで計測した信号や、干渉計や反射計などへ適用することが可能である。

本報告においては、干渉計測に対して本手法を適用し、高分解能化に成功した例について報告する。

2. 解析信号法の干渉計測器への適用

ヘリオトロン J 装置の従来のマイクロ波干渉計システムにおいては、ショットキーバリアダイオード(SBD)によって検出される信号光 (Probe Beam) 信号と参照光 (Reference Beam) 信号を位相検波器に入力し、出力される位相差信号に相当する変換係数を乗ずることで線平均密度を求めていた（Fig. 1 (a)）。ここで信号/参照光の中間周波数（IF）1 MHz である。その時間および信号の分解能は位相検波器および ADC の性能で決まり、本システムの場合は 25 kS/s であった。

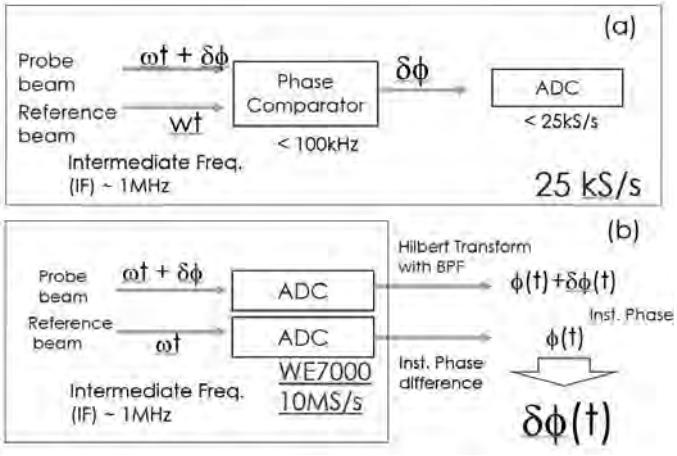



図 1 (a)ヘリオトロン J 装置の従来の干渉計システムと(b) 瞬時位相評価による干渉計システムの構成。

そこで、本研究では信号/参照光を 10 MS/s の ADC にて直接記録し、解析信号法によって瞬時位相を求め、両者の位相差から密度を計測することを試みた。システムとしては、位相検波器を排除し、直接 ADC にて SBD 信号を記録するというシンプルな構成となる（図 1 (b)）。

実際に、本システムによって計測した例を図 2 に示す。実験は、ECH モジュレーション加熱を適用したプラズマにおいて行った。ECH のモジュレーション周波数は 0.5 kHz である。従来の干渉計システムと瞬時位相評価法による干渉計システムとの比較を図 2(b)と(c)に示す。従来の干渉計では密度への応答は位相計の分解能以下となりほとんど観測できなかったが、瞬時位相によって評価した場合、明確にモジュレーションと同期した応答を確認できた。応答した密度の程度としてはおよそ 2%程度である。また、図 2(d)に示すように、磁気信号においては、モジュレーションと同期した揺動の増減が確認される。線平均密度の信号においても、磁気信号と比較すると明瞭ではないものの同期した信号が観測された。

更に、干渉計信号と磁気信号のスペクトルの比較を図 3 に示す。磁気プローブ信号だけでなく、干渉計信号においてもモジュレーションと同期した揺動の応答が明確に確認できる。今後、モジュレーション時の分布勾配-揺動の関係などを議論することが可能になると考えられる。

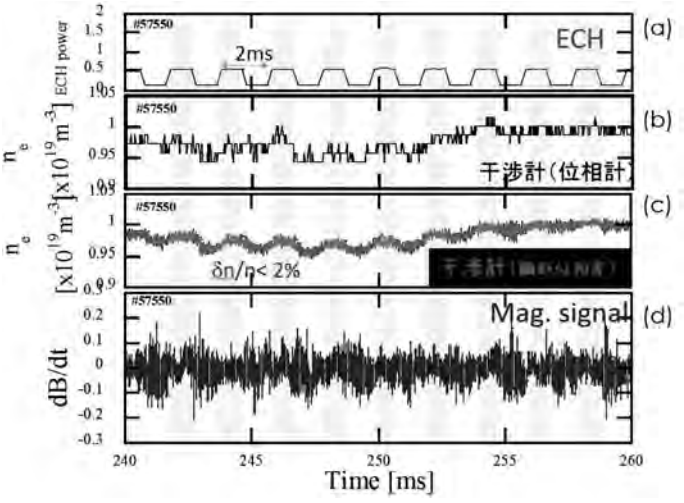



図 2 (a)ECH 加熱パワー、(b)従来の干渉計システムによって計測された線平均密度、(c)瞬時位相評価による干渉計システムによって計測された線平均密度、(d)磁気プローブ信号。

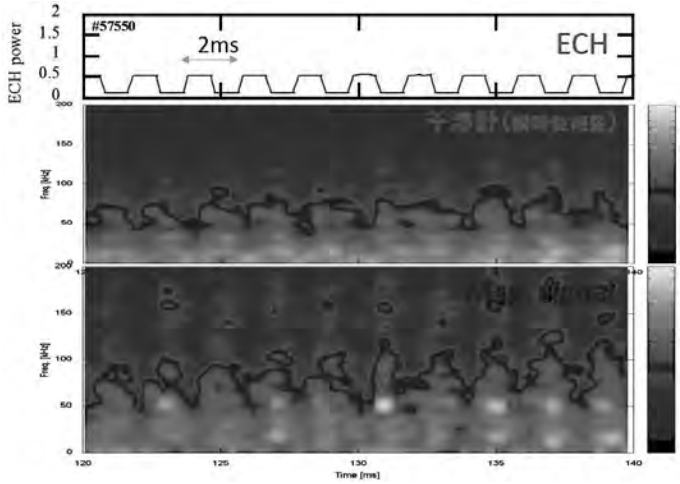



図 3(a) ECH 加熱パワー、 (b) 瞬時位相評価による干渉計システム計測された線平均密度、および (c) 磁気プローブ信号のスペクトログラム。

３．まとめと今後の課題

本研究によって、従来の干渉計システムの若干の変更と解析信号を用いた解析によって、揺動計測可能な干渉計システムへの高性能化が可能であることを示した。今後、更に反射計への適用など含め、幅広い応用の可能性を検討する。

# 26 特 2-11

## 直線磁化プラズマにおけるストリーマー構造の解析

九州大学　基幹教育院　山田 琢磨

**・目的**

プラズマ乱流中のメゾスケール構造（ストリーマーやゾーナルフロー）は径方向輸送に大きな影響を与えるため、近年トロイダルプラズマや直線プラズマで広く研究されている。直線プラズマは低温度で近接性に優れ、乱流やメゾスケール構造の計測に有意である。九州大学応用力学研究所の直線プラズマ実験装置 PANTA の前身 LMD-U において、メゾスケール構造の一種であるストリーマーとその媒介波が世界で初めて発見された[1][2]。また、PANTA 装置のエンドプレートに正電圧バイアスをかける実験では、ストリーマー構造から孤立波状態への遷移が観測され、エンドプレートバイアスによってストリーマーの制御が可能であることが確認された[3]。本研究では引き続き PANTA のストリーマー構造に対するエンドプレート実験を継続し、バイアス中の二次元フーリエスペクトルの変化や非線形結合（バイコヒーレンス）の変化を調べることでストリーマー構造の変化を観測し、ストリーマーの制御や発生機構の解明など更なる研究の進展を目指す。

**・実験方法**

直線プラズマ実験装置 PANTA を用いてストリーマー実験を行い、エンドプレートバイアス実験によってストリーマーの構造や、二次元スペクトル、バイコヒーレンスがどのように変化するかを観測した。PANTA は軸方向の長さが $z = 4$ m、内径 $r = 0.45$ m の直線装置である。ソース部に付けられた内径 95 mm のガラス管に RF 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た。軸方向の磁場には 0.09 T を選び、内部に封入したアルゴンの圧力を 0.8 mTorr に調整することで、ドリフト波乱流がストリーマー構造を形成した。中心部の密度は $10^{19}$ m$^{-3}$ 程度、電子温度は 3±0.5 eV のおおよそ平坦な分布である。軸方向 $z = 1.885$ m の位置に周方向 64 チャンネル静電プローブが設置されている。このプローブにより、半径 $r = 40$ mm の位置での詳細で精度の良い乱流の二次元フーリエスペクトルを観測した。また、軸方向 $z = 1.625$ m の位置には径方向 5 チャンネル静電プローブが設置されており、プラズマの電子密度や浮遊電位分布を測定する事ができる。エンドプレートの近傍の $z = 3.95$ m の位置に、プラズマの直径のほぼ半分となる直径 50 mm の電極があり、そこに最大で 50 V までの電圧を印加した。

**・実験結果**

PANTA にストリーマー構造が発生している状態（磁場 0.09 T、圧力 0.8 mTorr）でエンドプレートプレートバイアス実験を行ったところ、印加電圧に応じてバイアス電流が流れ、電圧に対して線形に応答したが（10 V に対して 3 A 程度）、バイアス電圧が 20 V 以上になるとバイアス電流が 6 A 程度で飽和した。ところがバイアス電圧を 50 V まで上げたところ、突然バイアス電流が 8 A まで流れる状態に遷移するようになり、6 A の低電流モードと 8 A の高電流モードの 2 つの状態を頻繁に行き来するようになった。以降は、元のストリーマー状態を S モード、低電流状態を B1 モード、高電流状態を B2 モードと呼ぶことにする。

バイアス中、バイアス電極より内側（$r < 25$ mm）の径では電子密度が上昇し、外側（$r > 25$ mm）では電子密度が減少し、電子密度の径方向分布はバイアス前よりピーキングした形となった。また、B2 モードでは B1 モードに比べてよりピーキングが強くなった。電子密度揺動に関しては、全ての径で揺動の絶対レベルは減少し、特に B2 モードでは減少が顕著であった。ただし、外側の径では電子密度の平均値も減少しているため、相対揺動レベルはバイアス中でも変わらないか、むしろ上昇した。以上のことから、バイアス実験を行うことで電子密度分布はピーキングし、プラズマの乱流揺動が抑制されることが分かり、プラズマ乱流の制御に効果的であることが分かった。

次に、バイアス実験によるストリーマー構造の変化を時空間構造、二次元スペクトル、バイコヒーレンスの変化を観測することで調査した。図 1(a)はストリーマー状態時の電子密度揺動の時空間構造である。右上方向に伝播する数 kHz の伝送波が包絡線構造を形成し、包絡線構造自体は右下方向に 2 kHz 程度で伝播していることが分かる。図 1(b)は B1 モード、(c)は B2 モードの時空間構造である。徐々に包絡線構造が失われ、右下方向に伝播する 2 kHz 程度の孤立波状態に遷移していることが分かる。図 1(d)(e)(f)はそれぞれストリーマー、B1 モード、B2 モードの密度揺動の二次元スペクトルである。正の周波数を持つ波が先の伝送波、モード数 1/周波数 –2 kHz 程度の波が媒介波（包絡線構造と同じ構造）である。バイアス中は B1 モード、B2 モードと変化するにつれて伝送波成分が減少し、媒介波が強くなった。また、媒介波の高調波成分が多く生じるようになり、時空間構造が孤立波状態に変化したことと一致した。また、オートバイコヒーレンスを計算すると、B1 モード、B2 モードと変化するにつれて伝送波が関わる非線形結合が減少し、媒介波の自己結合が増加することが分かった。

以上のことからストリーマー状態にエンドプレートバイアスをかけることでストリーマー構造が破壊され、媒介波を基本波とした孤立波構造に遷移することが分かった。この結果は、装置外部から容易にストリーマーの制御が行える可能性を示し、非常に重要である。今後は二次元バイコヒーレンスや、径方向構造の変化なども調査していく予定である。

**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] T. Yamada *et al.*, Nucl. Fusion **54**, 114010 (2014).

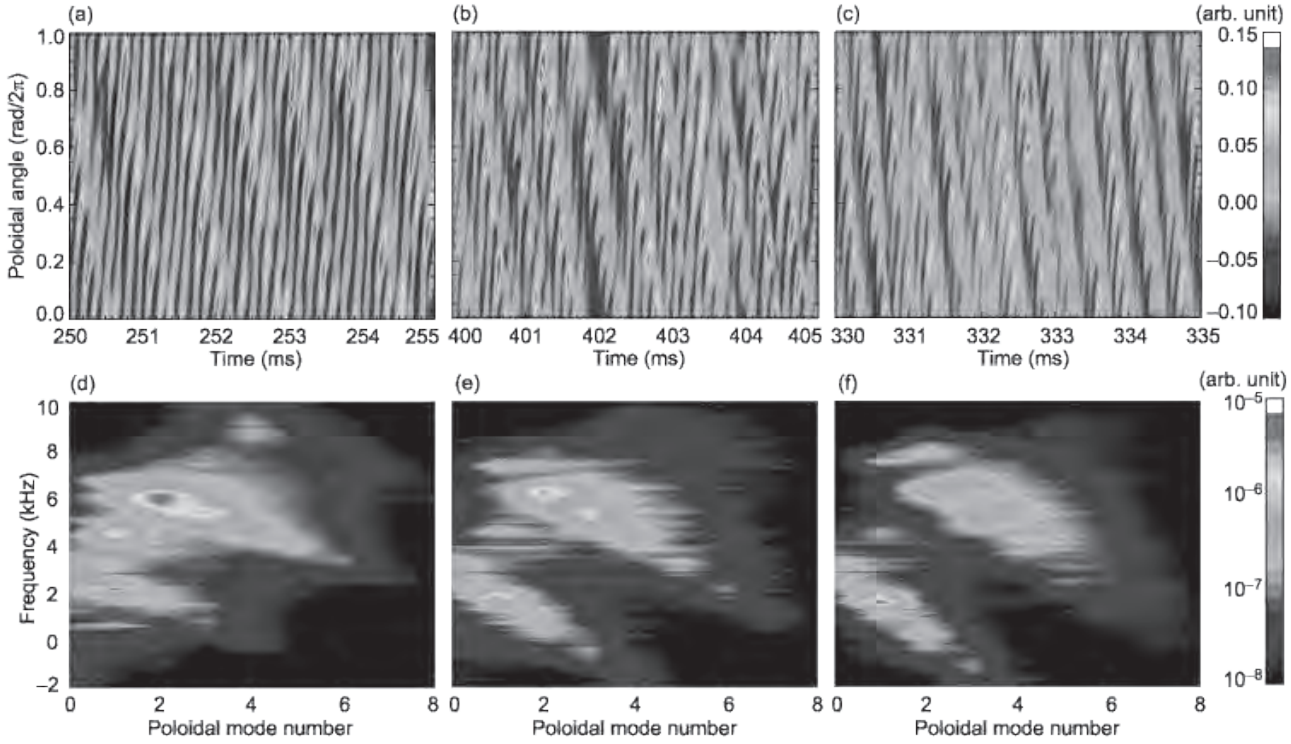




図 1. (a)ストリーマー状態、(b)B1 モード、(c)B2 モードにおける電子密度揺動の時空間構造。(d)ストリーマー状態、(e)B1 モード、(f)B2 モードにおける電子密度揺動の二次元スペクトル。時空間構造で右上に伝播する波が二次元スペクトルでは正の周波数を持つ。モード数 1 で負の周波数を持つ波がストリーマー構造の媒介波であり、バイアス中は高調波が生じている。

# 「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。

特に今年度は、核融合科学研究所の大型ヘリカル装置（LHD）において観測されている高速イオン励起 GAM(EGAM)発生時にバルクイオンのエネルギースペクトルが変化する現象の物理機構の解明のために、EGAM のポロイダル 2 次元空間構造を直接的に計測する手法の開発を目的として本研究を進めた。

・　実験方法

高速イオン励起 GAM からイオンへのエネルギーの流れに関しては、M. Sasaki et al. Plasma Phys. Control. Fusion **53**, 085017 (2011)により理論的にその可能性が示されている。しかし、なぜ高速イオンによって共鳴励起された EGAM がさらにエネルギーの低いバルクプラズマと共鳴条件を満たすのかは明らかではない。そのモデルとしてポロイダル断面上の非対称性の存在が共同研究者（佐々木）により提案されており、HIBP を用いてその検証を試みた。

HIBP ではビームの入射角を掃引することにより、1 次元分布を測定することが出来るが、さらにビームエネルギーを変えることにより計測位置を 2 次元に掃引することが出来る。ただし、ビームエネルギーを変更すると、それに応じてビームラインの制御パラメータの変更と調整を行う必要があり、従来はその作業に 30 分程度の時間を要すため、実際の実験時にビームエネルギーを変更することは困難であった。そこで、ビームラインパラメータの自動変更、調整システムを構築した。これにより放電シーケンス間(約 3 分間)にエネルギー変更して測定することが出来るようになった。

これを用いて 9 通りのビームエネルギープラズマ断面を掃引した。すべてのビームエネルギーでデータの取得には成功したが、信号／ノイズ比（S/N 比）が低く、現時点では、電位揺動の 2 次元非対称性を検証するまでには至っていない。

S/N 比改善の手法としては、イオン種を変えることが考えられる。遠隔操作によるイオン種変更機構は本年度完成したため、来年度以降の実験において、引き続き 2 次元構造の検証実験を行う予定である。

・　研究成果報告

1. 井戸　毅、長壁正樹、清水昭博, 西浦正樹、渡利徹夫, 小川国大, 伊藤公孝, LHD 実験グループ, 「LHD における高速イオン励起 GAM の同定」
   第 10 回核融合エネルギー連合講演会(筑波, 2014 年 6 月 19 日―20 日)
   ポスター発表

2. 井戸　毅, 長壁正樹、清水昭博、西浦正樹、渡利徹夫、小川国大、伊藤公孝、LHD 実験グループ
   「LHD における高速イオン励起 GAM の特性」
   Plasma Conference 2014 (新潟, 2014 年 11 月 18 日－21 日)

・　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　教授
佐々木　真　　九州大学応用力学研究所　助教

# 26 特 2-13

レーザー光波面の乱れを利用したプラズマの乱流計測手法とデータ処理方法の開発

核融合科学研究所・ヘリカル研究部　秋山毅志

目的

プラズマの閉じ込め性能を向上させるためには、乱流の物理機構を理解することが重要である。その計測は様々な手法があるが、本研究ではレーザー光の波面の乱れからプラズマ乱流の情報を引き出す手法を提案し、実証することを目的とする。本手法は非接触で、かつ干渉や変調などの作用を用いずに、直接的に乱流を計測できる特徴がある。

実験方法

地上に設置した天体観測用望遠鏡では、像の瞬きやボケが問題となる。これは、大気の温度揺らぎによって観測対象からの光の波面が乱されるためである。そこで、すばる望遠鏡を始めとする大型望遠鏡では、「補償光学」を追加して解像度を高めている。補償光学とは、波面の乱れを測定するセンサと可変形鏡、そして帰還制御のための計算機からから成る。波面センサは入射光の波面の乱れを測定し、その信号を元に可変形鏡がミラー形状を変形させて波面の乱れを補正し、像のボケを大幅に改善している。

本研究では、図 1 のようにプラズマ中にレーザー光を入射し、上記の大気の揺らぎをプラズマ中の乱流や不安定性に置き換え、乱流によって乱された波面を波面センサで測定しようという試みである。本手法をプラズマ計測に応用するのは初の試みであり、そのため第一ステップとして波面センサは市販のものを利用する。現在、CMOS カメラの前面にマイクロレンズアレイを配置した、シャックハルトマン型波面センサを利用する予定である。シャックハルトマン型波面センサに平面波が垂直に入射した場合は、マイクロレンズアレイによって CMOS 上に集光点が等間隔の格子状にできるのに対し、波面が傾いたり乱れたりした場合は、集光点が不規則に点在することになる。

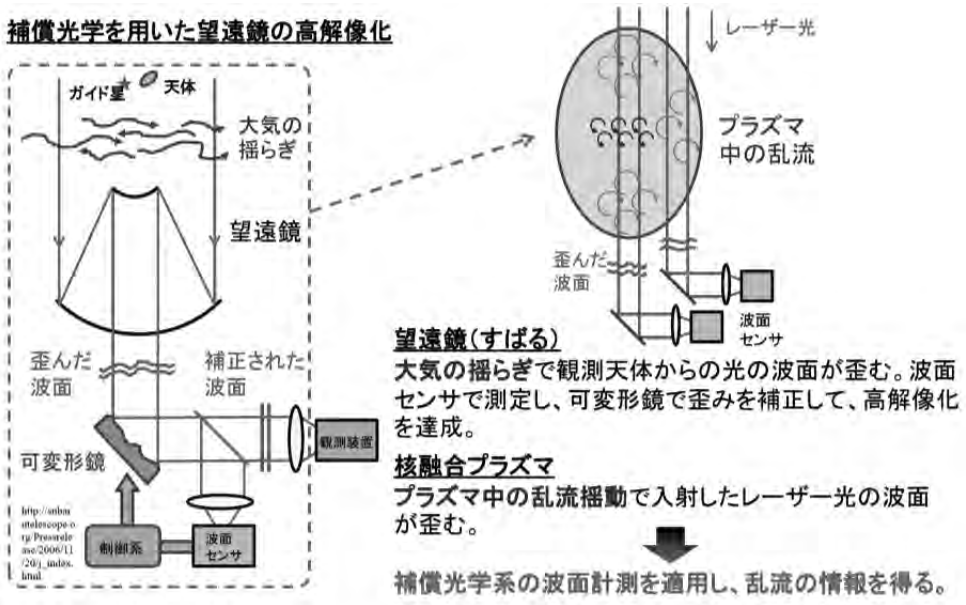



図 1:波面乱れを利用したプラズマ乱流計測の概念図

その集光点の変位から、波面の情報を得ることができる。現在市販されているシャックハルトマン型波面センサは、フレームレートが 880 Hz であるため、単独では高周波の揺動計測を行うことは難しい。そのため、イベントトリガとして他の計測データを利用し、条件付き平均などを用いることにより、時間分解能を補うことが必要である。

光源レーザーには、波長 1.064 μm の Nd:YAG レーザーを用いる。乱流による位相変化（＝波面の乱れ）の大きさの観点では、赤外領域などより長波長の方が位相量が大きく好ましいが、現在入手可能な波面センサの帯域は可視～近赤外であることから、本波長のレーザーを選定した。利用する Crysta Laser の半導体励起の連続発振レーザーは、縦横シングルモードの発振で、干渉計にも使える周波数安定性（＝位相の安定性）を持ち、波面測定には適したレーザーである。

現状で構成できる波面計測は、乱流の信号を得るためには計測系や分解能等の面で工夫が必要であるため、その原理検証には大きな乱流や不安定性を誘起でき、またそれらの特性が他の計測器で測定できることが望ましい。その点、PANTA 装置はそれらの条件に適しており、図 2 に示す配置で初期計測を行う。まずは、PANTA 装置の多くの計測視線と同様に、直線プラズマに対して垂直に観測を行うため、磁場コイル間に上記のレーザー及びミラー、レンズ系を配置する。対向する真空容器窓の外に波面センサを配置し、乱れた波面の計測を行う。

以上の原理検証実験を、平成 27 年 3 月に実施する予定である。その際、有意な大きさの波面乱れが計測できない場合は、対向位置の波面センサをミラーに置き換え、複数回レーザー光を往復させて光路長を稼ぐか、エンド部からプラズマ生成部に向ってレーザー光を入射し、プラズマの軸に沿った長い視線での計測に変更することを検討している。また、本計測はレーザー光軸に沿った乱流の線積分値であるため、局所的な情報を得ることは単一視線では不可能である。そこで、交差する 2 視線を用意し、両者の積分値の相関を取ることで、交差部分の局所情報を試みる。

<u>研究組織</u>

研究代表者：秋山毅志（核融合研）

研究協力者：居田克巳（核融合研）、稲垣滋（応力研）

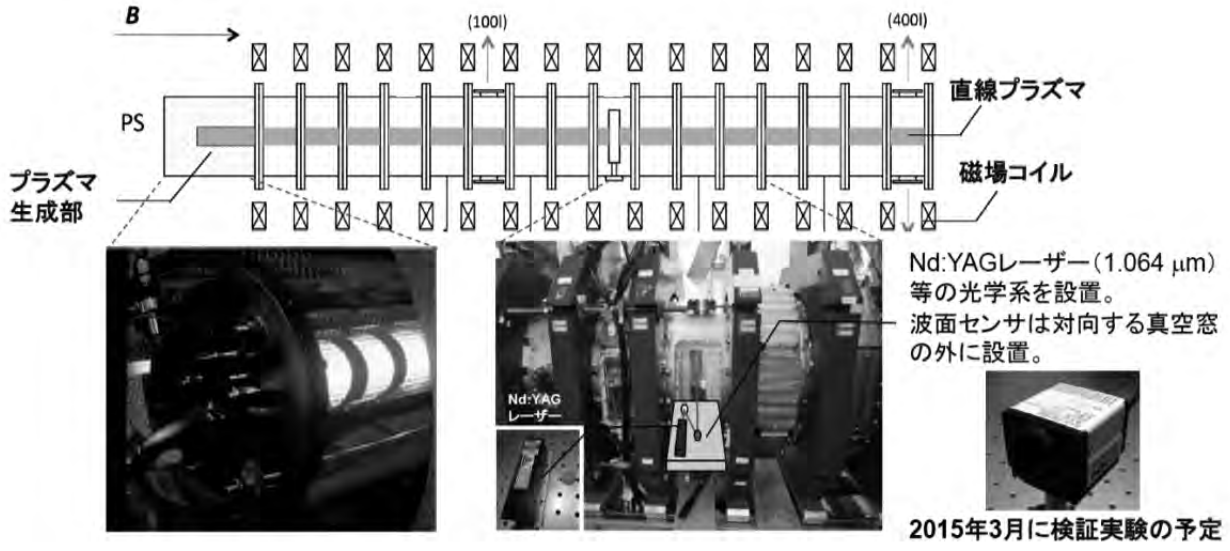



図 2: PANTA 装置での波面乱れ計測の原理検証実験の配置図

# 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ッ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。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、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。研究集会後も引き続き議論を深め、フェーズアレイ、アダプティブアレイアンテナを用いた計測・解析が一つの課題と考えられた。データストリーミング法や Capon（DCMP）法を用いた適応信号解析が共通の課題として上げられ、具体的な共同研究課題として進めることとした。大気乱流の 3 次元構造の解像では、乱流構造の高さ方向分解で異なる周波数を用いた散乱計測が行われている。プラズマ密度分布計測でも、異なる周波数を用いた反射計測が行われている。両者ともフェーズアレイ、アダプティブアレイアンテナを用いた計測・解析で、同一の解析手法が適用できる。共同研究の成果は、６月に開催される国際会議（20th Topical Conference on High-Temperature Plasma Diagnostics）で発表され、学術雑誌に２編の研究論文として発表された。心電図解析で用いられるテンプレート法を用いたプラズマ揺動解析、また高速ミリ波切替器による高性能フィルタの開発など、実験手法、解析手法ともに分野を横断した議論、適用が行われた。

# 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

京都大学生存圏研究所 山本真之

## 1. 研究目的

EarthCARE（EC）衛星は、ミリ波雲レーダー（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貢献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。EC 衛星用 CPR で計測するドップラー速度を用いた雲微物理量リトリーバルにおいて、鉛直流はリトリーバルされた雲微物理量の不確定性を生む大きな要因である。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とその評価が必要である。

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ー・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、高精度の鉛直流・雲物理量・降水物理量の観測データセットを作成する。

## 2. 研究成果

### 2.1 鉛直流計測データの処理手法の開発

WPR は、屈折率擾乱に起因するエコー（乱流エコー）のドップラースペクトルから鉛直流及び乱流強度を計測する。近年のレーダーイメージング技術の発展に伴う高分解能化により、WPR の取得データ量は最大で数 100GB/日に及ぶ。そのため、計算機実験により，高速かつ高精度でドップラースペクトルのパラメータ（受信強度・ドップラー速度・スペクトル幅；以下、スペクトルパラメータ）を計算する手法を開発した。さらに、スペクトルパラメータの計測誤差を定量的に評価する方法を確立した。開発成果を学会で発表するとともに、査読付き論文として公表した（Gan et al., 2014）。

50MHz 帯 WPR は，乱流エコーと降水粒子エコーを分離して受信可能であるため、降水領域中の鉛直流を高い時間・鉛直分解能で計測できる唯一の測器である。しかし、降水領域内の鉛直流測定における降水粒子の影響を定量的に評価するとともに、降水粒子の影響を極力小さくすることで高精度の鉛直流計測データを得る手法は確立していない。そのため、計算機実験と 50MHz 帯 WPR による観測データを用いることで、降水領域内において鉛直流を高精度で推定できる手法を開発した。乱流エコーを検出するドップラー速度範囲に制約を加えて鉛直流を推定することで、鉛直流計測における降水粒子の影響を極小化できることを示した。さらに、ドップラー速度範囲に制約を加えて得た受信強度とスペクトル幅に補正を加えることで、これらの計測精度が向上できることを示した。開発成果を学会で発表するとともに、査読付き学術雑誌に投稿した。

### 2.2 1.3GHz 帯レンジイメージング WPR の開発

レンジイメージング（RIM）は、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 の高鉛直分解能（30-50m）計測を可能とする。RIM 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できる、有用な手段である。高速サンプリングと低コストを両立するデジタル受信機を開発し、1.3GHz 帯 WPR にオーバーサンプル（OS）付き RIM 機能（RIM-OS）を実装することで、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を実現した。RIM-OS 機能付き 1.3GHz 帯 WPR で得られた大気境界層内のサーマル等の観測成果を、学会で発表した。

### 2.3 WPR 用デジタル受信機の開発

1.3GHz 帯 WPR 用に開発したデジタル受信機の汎用化を進めることで、50MHz 帯 WPR に OS 付き RIM 機能を付加することに成功した。開発成果を学会で発表した。さらに、OS 付き RIM 機能を付加した 50MHz 帯 WPR・1.3GHz 帯 WPR・CPR 等の同時観測を 2014 年に実施した。現在、観測データの解析を進めている。

## 3. 今後の展開

50MHz 帯 WPR・1.3GHz 帯 WPR・CPR 等の同時観測で得られた高分解能の風速・大気乱流・雲の計測データの解析を通じ、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精度向上と地上検証計画の立案に寄与していく。WPR の計測精度劣化の要因となる地面等からの不要信号(クラッタ)のアダプティブな抑圧に必要となる、デジタル受信機の多チャンネル化を実現する。これらの今後の開発成果を通し、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貢献していく。

## 4. 論文及び学会発表


**論文**

- Gan, T., M. K. Yamamoto, H. Hashiguchi, H. Okamoto, and M. Yamamoto, Error estimation of spectral parameters for high-resolution wind and turbulence measurements by wind profiler radars, Radio Sci., 49(12), 1214-1231, doi:10.1002/2013RS005369, 2014.
- 山本真之, マルチリモートセンサーによる雲の微細構造の解明, 低温科学第 72 巻"雲とエアロゾルをつなぐ観測とモデリング"(藤吉康志編・北海道大学低温科学研究所発行), 195-205, 2014.

**学会発表**

- Yamamoto, M. K., T. Gan, M. Yabuki, H. Hashiguchi, H. Okamoto, T. Nakajo, and M. Yamamoto, Vertical wind measurement in the boundary layer by 1.3-GHz range-imaging wind profiler radar, EarthCARE Workshop 2014, Tokyo, Japan, 17-19 September, 2014.
- Gan, T., M. K. Yamamoto, H. Okamoto, H. Hashiguchi, and M. Yamamoto, Development of a signal processing method for vertical wind velocity measurement by wind profiler radars, EarthCARE Workshop 2014, Tokyo, Japan, 17-19 September, 2014.
- Yamamoto, M. K., T. Gan, H. Okamoto, H. Hashiguchi, and M. Yamamoto, Validation of EarthCARE product using vertical wind measurement by wind profiler radars, EarthCARE Workshop 2014, Tokyo, Japan, 17-19 September, 2014.
- Gan, T., M. K. Yamamoto, H. Hashiguchi, H. Okamoto, and M. Yamamoto, Error estimation of spectral parameters for high-resolution wind and turbulence measurements by wind profiler radars, 14th International Workshop on Technical and Scientific Aspects of MST Radar (MST14), São Jose dos Campos, Brazil, 25-31 May 2014.
- Yamamoto, M. K., T. Gan, T. Fujita, Noor Hafizah Binti Abdul Aziz, H. Hashiguchi, T. Nakajo, H. Okamoto, T.-Y. Yu, and M. Yamamoto, Development of a range-imaging boundary layer radar with oversampling capability, 14th International Workshop on Technical and Scientific Aspects of MST Radar (MST14), São Jose dos Campos, Brazil, 25-31 May 2014.
- Gan, T., M. K. Yamamoto, H. Okamoto, H. Hashiguchi, and M. Yamamoto, Development of a method for estimating vertical wind velocity in precipitation using VHF atmospheric radars, 日本気象学会 2014 年度秋季大会, C305, 福岡県福岡市, 2014 年 10 月.
- 山本真之, GAN Tong, 岡本創, 大野裕一, 橋口浩之, 山本衛, ウィンドプロファイラーによる鉛直流計測を活用した EarthCARE 衛星雲プロダクトの検証提案, 日本気象学会 2014 年度秋季大会, P145, 福岡県福岡市, 2014 年 10 月.
- Gan, T., M. K. Yamamoto, H. Hashiguchi, H. Okamoto, and M. Yamamoto, Measurement of vertical wind in precipitation by the MU radar: A case study, 第 8 回 MU レーダー・赤道大気レーダーシンポジウム(第 260 回生存圏シンポジウム), 京都府宇治市, 2014 年 9 月.

# 26 特 3-2

## リアルタイム画像生成のための合成開口レーダ解析とその応用

九州大学産学連携センター　間瀬　淳

１．はじめに

マイクロ波イメージングは、プラズマ中の揺動現象の時間空間的振舞いと閉じ込めへの影響を研究する有力な手段として注目されているが、各種プロセスの内部構造可視化（非破壊検査）、車載レーダ、航空機搭載レーダ等、リモートセンシングの分野でも有用である。我々も平成 19 年度よりスポットライト方式マイクロ波合成開口レーダ（Synthetic Aperture Radar: SAR）の研究を進め、平成 24 年度までに周波数 15.5±0.8 GHz のシステムを製作、平成 24-25 年度ヘリコプター搭載による画像取得試験を実施した。平成 26 年度は、研究分担者の一人（近木）により、画像処理ソフトの改良、および空間分解 10 cm とリアルタイム処理の実現を目指した研究が進められている。

マイクロ波 SAR では電波法により周波数帯域が制限されるため（2 GHz 以下）、十分な空間分解を実現することが困難という問題がある。代表者等は、この問題を克服するため、マイクロ波で振幅変調された近赤外レーザレーダを用い、合成開口処理により被測定対象の二、三次元イメージングを実現することを提案してきた。レーザの変調周波数は電波法の規制に該当しないため、1-18 GHz の超広帯域変調が可能であり、反射光信号の解析を復調マイクロ波領域で行うことにより、マイクロ波 SAR では実現不可能な空間分解 1-10 cm が期待される。

マイクロ波変調レーザ SAR は、光無線融合を利用した計測開発ということができる。空間に放射されるのは、安全性に優れた赤外光であり、マイクロ波は空間に発射されないことに加えて以下の特長を有している。

ｉ）従来型パルスレーザレーダでは反射レーザ光の強度だけが測定され、位相データを測定することはできない。本開発システムでは、通常のマイクロ波 SAR と同様に、振幅・位相両成分を測定できる。

ⅱ）合成開口レーダにおける信号処理において、しばしば SN 比低下の原因となるスペックル雑音については、マイクロ波を光源とする場合大きな問題となるが、本研究のようにレーザを光源とする場合は問題とならない。一方、レーザを使用する際課題となるコヒーレント長については、本研究のように復調したマイクロ波領域で信号処理を行うため殆ど影響してこないことになる

２．マイクロ波変調レーザ応用合成開口レーダ

平成 26 年度、送受信光学系として、フィールド試験にも対応できるよう、光軸調整が容易で雑音・振動にも強いモノスタティック方式を製作した。マイクロ波変調レーザ出力は、増幅されたのち光ファイバー、サーキュレータを経由してファイバーコリメータに入力され放射される、物体からの反射光は、同じファイバーコリメータに入力され、光ファイバーに入り光受信器でマイクロ波信号に変換される。

レーザレーダの原理再検証の一環として、チャープマイクロ波を発生する電圧制御発振器の変調信号として、任意波形発生器を使用し変調周波数の線形性を改良させた。周波数掃引形（FM-CW）レーダでは、反射波と参照波をミキサに入力することにより得られる中間周波数出力は、反射波までの距離に比例することが知られているが、本レーザレーダにおいても図 1 に示すように同一な結果が得られた。周波数掃引幅 5 GHz、掃引時間 0.1 ms である。線形性の改良により、距離分解～1 cm が実現している。

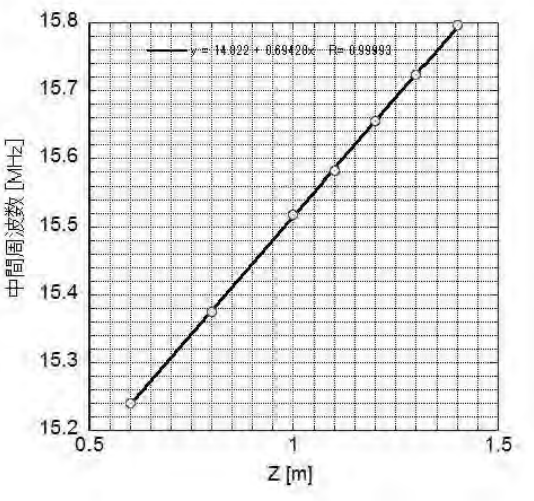



図1. IF周波数 vs. 物体までの距離.

合成開口イメージングの実現のためには、高精度チャープマイクロ波発生装置、およびレーザ出力を二次元掃引する駆動光学系が不可欠である。平成 19～24 年度開発製作したマイクロ波 SAR では掃引周波数幅 2 GHz をもつ高精度チャープマイクロ波発生装置を製作した。本研究では掃引周波数 18 GHz が必要であるため、予算上の課題もあり、ベクトルネットワークアナライザ（VNWA）を適用することにした。VNWA の周波数領域は 1MHz～30 GHz、掃引速度は 0.2 ms/point である。また、微弱光信号の増幅のため、低出力光増幅器を使用し、中出力増幅器との間にバンド幅 1 nm をもつ波長可変フィルタを挿入して SN 比の改善を図った。現在のシステム構成を図 2 に示した。

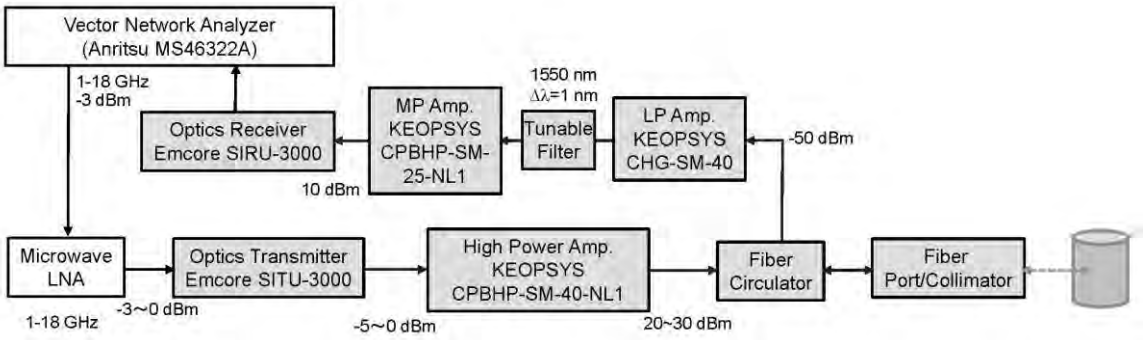



図 2. マイクロ波変調レーザ応用合成開口イメージング装置の構築.

３．駆動光学系の設計・製作

スポットライト方式合成開口イメージングのためには、レーザ光を掃引する必要がある。本研究では、ｉ）送受信部に回転ミラーを用い、被測定対象への光照射を二次元掃引する。ii）GPS アンテナ付ジンバル制御システムを使用する、の二方式について設計製作を進めた。回転ミラーはガルバノスキャニングシステムで、応答速度は 200 μs/step、φ 10 mm のビームを±20° の領域で *xy* 方向に掃引する。一方、ジンバル制御装置は、動作範囲 -25～20° で、応答速度は 45° /s である。500 m 遠方では 180 m×180 m の領域に相当する。いずれも今年度中に完成予定となっている。

４．まとめ

レーザレーダとしての原理的検証では、電圧制御発振器の周波数掃引の線形性を向上することにより、レンジ方向の空間分解 1 cm が得られた。本年度は第一に、反射波の位相情報を精度良く求めるためのシステムの整備があり、高精度チャープ信号の発生と位相信号の取得のためベクトルネットワークアナライザを用いることにした。レーザ光掃引には、ガルバノ式回転ミラーあるいはジンバル制御装置を整備し、トモグラフィー方式ないし合成開口方式イメージングの検証を実験室で進める。その後フィールド試験、車両搭載による地上試験に移行する予定である。

５．研究成果報告

[1] X. Wang, I. Sakagami, A. Mase, M. Ichimura, IEEE Trans. Microw. Theory Tech. **62**, 3, 422-430 (Mar. 2014).
[2] D. Zhang, A. Mase, Biomedical Eng.: Applications, Basis and Communications **26**, 1450004 (Apr. 2014).
[3] X. Wang, A. Mase, H. Ikezi, M. Inutake, Y. Kogi, K. Uchino, J. Electromagnetic Waves and Applications **28**, 917904 (Jun. 2014).
[4] X. Wang, I. Sakagami, A. Mase, M. Ichimura, IET Microw. Antennas, Propagation, **8**, 9, 666-672 (Sep. 2014).
[5] 間瀬：「ミリ波イメージングレーダの基礎および応用と実用化事例」JTC セミナー (Nov. 2014).
[6] Y. Kogi, T. Higashi, S. Matsukawa, A. Mase, J. Kohagura, Y. Nagayama, K. Kawahata, D. Kuwahara, M. Yoshikawa, Rev. Sci. Instrum. **85**, 11D411 (Nov. 2014).
[7] X. Wang, I. Sakagami, Z. Ma, A. Mase, M. Yoshikawa, Int. J. Electron. Commun. **69**, 1, 418-423 (Jan. 2015)
[8] X. Wang, I. Sakagami, Z. Ma, A. Mase, M. Yoshikawa, M. Ichimura, IEEE Trans. Compon., Packag. Manuf. Technol. (in press).
[9] 間瀬、犬竹、王、池地、近木：平成 26 年度通研共同プロジェクト研究発表会 (2015 年 3 月 2 日).

6．研究組織

| | | | |
|---|---|---|---|
| 間瀬　　淳 | 九州大学産学連携センター | 伊藤　直樹 | 宇部工業高等専門学校 |
| 近木祐一郎 | 福岡工業大学電子情報工学科 | 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 | | 徳沢　季彦 | 核融合科学研究所 |
| 王　　小龍 | 筑波大学プラズマ研究センター | 出射　　浩 | 九州大学応用力学研究所 |

## 26 特 3-3

# 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

２月に開催した研究集会のプログラムを以下に示す。

日　時：　　平成２７年２月２６日（木），２７日（金）

場　所：　　核融合科学研究所研究棟 I-501 室

２月２６日（木曜日）

13:45-13:55　・研究集会開催にあたって
（九州大学応用力学研　花田和明）

13:55-14:00　・研究集会主旨説明
（九州大学応用力学研　出射　浩）

14:00-14:45　・高温高密度プラズマ中の加熱波動や揺動波動による協同散乱計測　（核融合科学研究所　久保　伸）

14:45-15:30　・高密度プラズマにおけるミリ波加熱のための Full-wave 解析の導入　（核融合科学研究所　伊神　弘恵）

15:30-15:40　コーヒーブレイク

15:40-16:25　・準光学高純度 HE11 モード発生器 モーメントシミュレータとキルヒホッフ積分コードの活用
（九州大学応用力学研　出射　浩）

16:25-17:10　・マイクロ波から赤外領域のレーダと応用について
（九州大学産学連携センター　間瀬　淳）

17:10-17:55　・LiveSAR 開発の現状
（福岡工業大学工学部　近木　祐一郎）

２月２７日（金曜日）

9:00-9:45　・テラヘルツ波を用いた高温プラズマ計測法の開発
（核融合科学研究所　徳沢季彦）

9:45-10:30　・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）

10:30-11:15　　・QUEST における反射計計測と FADIS について
（九州大学応用力学研　出射　浩）

11:15-12:00　　全体討論

平成２７年度核融合科学研究所の（作業会）一般共同研究「マイクロ波、ミリ波、テラヘルツ波の技術とそのプラズマ加熱・計測への応用」との合同開催で行われた。本申請研究集会との連携開催で有意義な議論・展開が図れるため、研究集会はあくまでも個別に行うが、連続開催で多くの参加者で議論することとした。平成２７年度核融合科学研究所の（作業会）一般共同研究「マイクロ波、ミリ波、テラヘルツ波の技術とそのプラズマ加熱・計測への応用」は２７日午後に開催された。

講演の要旨は以下の通り。

・　「高温高密度プラズマ中の加熱波動や揺動波動による協同散乱計測」
（核融合科学研究所　久保　伸）
高温高密度プラズマ中の加熱波動や揺動波動による協同散乱計測」
高温高密度プラズマ中の電子の密度揺動の波数・周波数を同定する手段として協同散乱計測は有望である。実際に、LHD においてはイオンの熱揺動に伴う電子の密度揺動からイオンの速度分布関数の計測(CTS)を行っており、多重反射の影響もあるが、有意の散乱信号を受信していることが確認された。QUEST 装置の電子バーンシュタイン波(EBW)加熱・電流駆動は重要なテーマであるが、その最適化には、加熱波動である EBW の伝搬・減衰過程を実験的に検出することが必要であるが、熱揺動ではなく、加熱励起波動であり、EBW が静電波であることから、散乱効率は CTS に比べると圧倒的に高くなることが予想される。ただし、QUEST で予想される EBW の波数から散乱計測に最適なプローブビームの周波数が 300-1000GHz 辺りにあり、発信源の入手可能性、受信器の感度の点からプローブビームの周波数を選択する必要がある。LHD の CTS 用に 300GHz 帯のジャイロトロンの開発が進められており、テラヘルツジャイロトロンも有力な候補となる。今後、EBW の分散関係を使って、EBW の電力密度、そこから決まる散乱効率を評価し、実際の計測配位を検討していく必要がある。

・　「高密度プラズマにおけるミリ波加熱のための Full-wave 解析の導入」
（核融合科学研究所　伊神弘恵）
プラズマカットオフ近傍での OX モード変換の描像を得るために、有限要素法による 2 次元 Full-wave 計算を行うための計算コード整備を進めている。有限幅を持つビームの伝播特性を解析するため、マルチレイによる光線追跡計算結果を参照して境界値となる波動電場

ベクトルの分布を与えられるようにした。2 次元 Full-wave 計算はプラズマ境界部における OX モード結合効果の解析にも応用する予定である。

・「準光学高純度 HE11 モード発生器：モーメントシミュレータとキルヒホッフ積分コードの活用」

（九州大学応用力学研究所　出射　浩）

モーメント法シミュレータによって、３次元電磁波解析を行うことができるが、商用ソフトウェアであるため、準光学鏡の設計などにはあまり適さない。キルヒホッフ積分コードは、断面の複素電界分布を与えれば、電磁波伝搬を扱うことができる。キルヒホッフ積分コードは九州大学で開発されたもので、準光学鏡の設計などに用いることができる。大電力ミリ波伝送に用いられる円形コルゲート導波管の主伝搬モード（HE11 モード)励起するモード発生器が開発された。２つ（集束・発散）のガウスビームを合成することで、ほぼ 100 ％のモード純度励起が可能で、実験的にも 98 %励起に成功した。

・「マイクロ波から赤外領域のレーダーと応用について」

（九州大学産学連携センター　間瀬　淳）

電磁波は、測定対象に入射した場合、その反射波、透過波の振幅・位相を観測することにより様々な情報を得ることができる。本グループは、必要とされる応用分野に対応して最適な波長（周波数）を選択し、実機適用を進めている。本会合では、その中で生体計測、車載レーダ、赤外レーザ応用合成開口レーダ（SAR）の研究を中心に報告した。生体計測は心拍・呼吸等バイタル信号の測定および解析のためのハード及びソフトの開発と実用化について、車載レーダでは現在の課題とその解決のための方策について、赤外レーザ SAR では高空間分解イメージングシステムとしての設計製作の状況、特に送受信光学系、二次元掃引のための駆動光学系、SN 比改善の方策等について報告された。

・「LiveSAR 開発の現状」

（福岡工業大学工学部　近木　祐一郎）

洪水時の浸水域検出のための Spotlight モード合成開口レーダ「LiveSAR」を開発している。これまでに地上および航空試験をおこない、10cm級あるいは30cm級解像度の地表の画像を撮像してきたが、高解像度画像取得の歩留まりや解像度、ゴーストの発生、測定レンジの短縮（目標15km、実績5km)等の点で問題があった。今年度は実験室内でのファイバスプールを用いた波形生成のアルゴリズムやレーダ制御方法のエラー改良を行った。改良後に地上試験を行ったところ、10cmあるいは30cm級解像度の画像が高いSN比で取れることを実証し、その結果、9kmのレンジの対象も撮像できることを示した。

・ 「テラヘルツ波を用いた高温プラズマ計測法の開発」
（核融合科学研究所　徳沢季彦）
将来の核融合炉において、テラヘツル波パルスを光源とするプラズマ計測に適した計測システムを構築するために必要なデバイスの開発試験（フィルタ、導波管、PCアンテナ等々）を説明された。また、計測実装において重要な開発要素である高時間応答性について、フィルタバンクを用いた方式、非同期光サンプリングを用いた方式などの特性試験について議論された

・「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・核融合科学研究所　徳沢季彦）
LHDでは、マイクロ波反射計を用いて、ICRF波動が引き起こす密度変動を測定し、波動物理の研究に用いている。H26年度は、これまでの測定データの解析を進めるとともに、マイクロ波源を増設し、近接した二周波数で測定を行った。測定位置がアンテナに近く、波動電場が強い場合には、電場と密度変動の線形性が悪いことが分かっている。これについて考察を進めた結果、波動電場によるポンデロモーティブ力で反射面が変形し、反射計測定の感度が変化することが原因として考えられることが分かった。

・ 「QUEST における反射計計測と FADIS について」
（九州大学応用力学研　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。反射計でのアダプティブアレイ法の適用が紹介された。計測においてはウィンドウプロファイラレーダ計測で用いられている計測システムが導入されている。前日に CTS でのフィルタが議論され、フィルタ適用に向けた FADIS（高速ミリ波切替器）の特に２周波数動作につき、詳細設計が示された。

全体討論・今後の進め方では、これまで進展のあったウィンドウプロファイラレーダ、プラズマ輻射計測でのアダプティブアレイ法、心電図解析、プラズマ解析でのテンプレート法など、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題した特定研究内容につき、総括・議論された。CTS への FADIS フィルタ適用などは、今後も継続して議論・検討することとした。

## 26 特 3-4

# 電子サイクロトロン周波数帯静電波の衝突減衰効果のモデリングに関する研究

核融合科学研究所　プラズマ加熱物理研究系　伊神　弘恵

本研究の目的

本研究では主に衝突減衰効果によるパワー損失も考慮にいれた電磁波と電子バーンシュタイン波(EBW)のモード変換領域付近の波動場の描像を、数値計算で得るための計算コードの開発を行うことを目的としている。モード変換領域近傍ではWKB近似が破綻するため、光線追跡計算では波動伝播の正確な描像を得ることができない。また、波動加熱/計測実験に用いられるアンテナの放射パタンは平面波とは異なり、波動電場は有限の非一様な強度分布を持つため、波動場の広がりの範囲内で磁場や密度が2次元的あるいは3次元的に変化する場合、単純なスラブモデルでの線形理論を適用したモード変換に関する解析は不正確となる。EBWによる高密度プラズマの加熱/電流駆動、ならびにEBWに由来する放射電磁波の計測は、QUEST装置をはじめとした高βプラズマ装置における重要な研究課題である。波動場の広がりや衝突減衰の効果を考慮してなお十分なEBW加熱効率/EBW由来波の受信信号強度が期待できるかを数値的に検討することは、重要である。

研究の方法

Maxwell方程式を境界値問題として解くTASK/WF2Dコードを用いて、OXモード変換が起こるエヴァネセント領域近傍の波動伝播の描像を、衝突項の寄与も含めて得られるようにする。マルチレイの光線追跡計算結果を参照して、エヴァネセント近傍点での有限幅をもつ波動電場の空間分布を与え、これを境界値として数値計算を行う。また、XBモード変換がおこる高域混成共鳴層近傍でも同様に衝突効果、運動論効果を入れた誘電率テンソルを用いて数値計算を行う。

経緯と結果

TASK/WF2Dコードを適用するには、2次元メッシュ空間において、磁場・密度・温度の分布と境界条件を与える必要がある。図1に示すように、O-Xモード変換が起こるプラズマカットオフの近傍で計算に用いる座標系を定義し、2次元的にパラメータが変化する計算領域を各メッシュ点で与えることができるようにしている。座標系の原点は、ビーム中心のレイに関する光線追跡計算を行って、磁場に対して垂直方向の屈折率が一定値を下回った点としている。今年度はビーム幅を考慮したマルチレイ計算を行い、各レイが図1の*xd=0*平面に達した際の座標点とパワーに関する重み係数を用いて得られる離散的なビーム強度

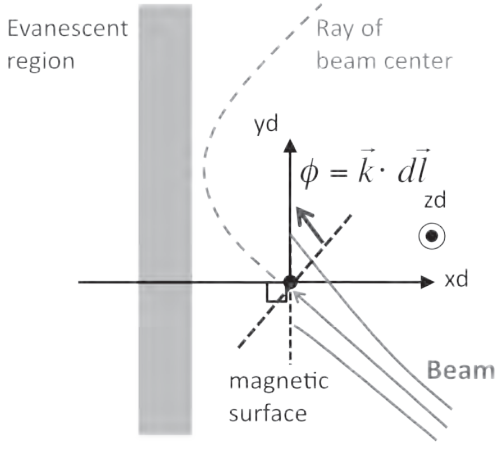



図1: 計算に用いる座標系

分布を 2 次元補間して yd 軸上のパワー分布を得られるようにした。図 2 に補間により作成した *xd=0* 平面上のビーム強度分布を示す。磁場に平行方向を $z'$ 方向とすると、一様プラズマ近似により光線追跡計算から得られた波数ベクトル成分を用いて波動方程式は式(1)のように書けるので、この式を解いて $E_{y'} = C_{y'}E_{x'}$, $E_{z'} = C_{z'}E_{x'}$ と表される係数 $C_{y'}$, $C_{z'}$ をもとめ、図 1 で用いる座標系への変換を行うことで $E_{xd}$, $E_{yd}$, $E_{zd}$, 成分を得ることができる。

$$\begin{pmatrix} k_{y'}^2+k_{z'}^2 & -k_{x'}k_{y'} & -k_{x'}k_{z'} \\ -k_{y'}k_{x'} & k_{z'}^2+k_{x'}^2 & -k_{y'}k_{z'} \\ -k_{z'}k_{x'} & -k_{y'}k_{z'} & k_{x'}^2+k_{y'}^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{x'} \\ E_{y'} \\ E_{z'} \end{pmatrix} = \frac{\omega}{c} \begin{pmatrix} S & -iD & 0 \\ iD & S & 0 \\ 0 & 0 & P \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{x'} \\ E_{y'} \\ E_{z'} \end{pmatrix} \qquad \text{式 (1)}$$

ここで、*S, P, D* は Stix パラメータである。さらに図 1 に示しているように、メッシュ点からビーム中心の群速度ベクトルに垂直な面の間の位相差 $\phi$ を考慮して、$(E_{xd}, E_{yd}, E_{zd})^t$ $exp(i\phi)$ とすることで、各メッシュ点間の電場の位相差を与える。図 3 に求めた $E_{xd}$, $E_{yd}$, $E_{zd}$ の実数成分と複素数成分の分布を示す。この初期値を用いて波動方程式を解き、O-X モード変換過程の波動伝播描像を得る予定である。また、高域混成共鳴層付近でも計算を行う予定である。

研究発表

H. Igami et al. “Modeling of the electron cyclotron wave propagation in the boundary region of the high dense plasma”, PLASMA2014, 18-21 Nov., Niigata (2014)

A. Fukuyama, H. Igami, H. Idei, “Full wave analysis of EC wave mode conversion in tokamak plasmas”, 41th EPS Conference on Plasma Physics P4.014, Berlin, 23-27.June (2014)

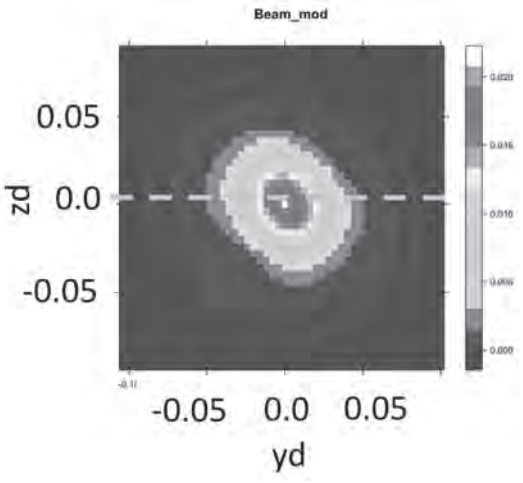



図 2: マルチレイ計算結果を補間して得た xd=0 平面でのビーム強度分布

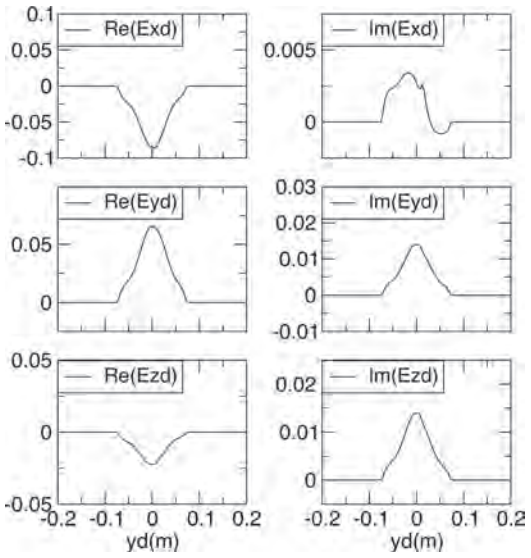



図 3: yd 軸上での各電場成分の分布

## 26 特 3-5

# 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

### 目的と概要

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・高性能化することが本研究課題の目的である。これまでの検討の結果、波動の直接検出にはミリ波からサブミリ波の散乱計測が有効であり、散乱断面積の小ささから大電力のプローブビームと高感度の受信システムを用意する必要がある。応用力学研究所においては 170 GHz 大電力ジャイロトロンおよび伝送入射システムを有効利用できる可能性があり、これを第一候補として検討を行ったが、予想される励起 EBW 波動の波長が伝搬とともに短くなり、170 GHz では、最も短波長の計測が可能な後方散乱 (180 度散乱) 条件でもモード変換直後の伝搬領域での測定に限られてしまうことが判明した。このため、より周波数の高いプローブビームと受信システムの検討を行うこととした。核融合科学研究所において行われている協同トムソン散乱計測においては、その散乱ソースとして現在 77GHz 大電力ジャイロトロンを用いているが、次期計画として、より高密度で、屈折の影響を受けにくく、さらに、背景電子サイクロトロン放射のレベルが少ない 300GHz 帯のジャイロトロンを想定しており、福井大学においてジャイロトロン開発が行われている。また、それを用いた伝送システムの検討もすすめられている。そこで、今年度は 300GHz 帯のソースを用いることも視野に入れて検討を加えた。

### 研究の具体的方法

予想される EBW のパラメータに対してミリ波からサブミリ波をプローブビームとして使用することを想定して波動の直接計測の可能性を検討する。このために、

1. 予想される 8.2GHz の入射アンテナから励起される EBW 動による密度揺動強度及び波数の評価をおこなう。
2. 直接計測可能な EBW 動の波数範囲と電力密度を評価し、いくつかの可能性のあるミリ波からサブミリ波領域での最適かつ現実的な散乱計測のプローブビーム及び受信系配置を検討する。
3. 受信散乱波強度を評価して、必要な受信系の構成、受信素子の選択を行う。
4. 定常プラズマの特性を生かした、波動の位相検出を含めた伝搬構造の詳細計測の可能性を検討する。

を順次進め、この計測の実現可能性、有効性を見極めた上で、実際の計測準備を行う。

### **raytrace** から予想される **EBW** の振舞と散乱計測

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 $N_{\parallel}$=0.56 とした

伝搬する過程で高域共鳴層に近づいて静電波であるEBWに変換されることがray traceコードで予想されている。この場合、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、300GHzや400GHz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(10°, 90°, 180°）に対応する波数をそれぞれ赤と青の実線で示した。入射電磁波がEBWに変換され、伝搬、吸収される。このEBWに変換された後の伝搬、吸収の過程において、伝搬波動の半径方向の波数が伝搬に従って大きくなり、吸収される吸収され段階では $2 \times 10^4$ m$^{-1}$ 程度になることが予想される。図に示したように、この場合、電子バーンシュタイン波を同定するためには、プローブビームとして300-400GHzの水平面を挟んで入射受信システムを構成した後方散乱を用いるのが適当であることが解る。

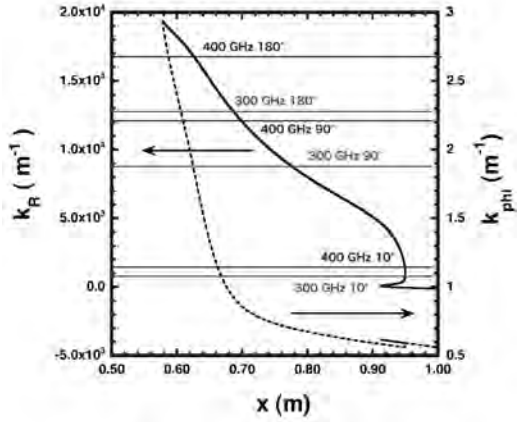



図 1. 8.2 GHz Oモードの電磁波をQuestの水平面外側からO-X-Bモード変換に最適な入射角で入射した場合の波数の変遷と300GHzと400GHzのプローブビームを用いた場合の散乱測定可能範囲

**EBW**に伴う伝送電力と密度揺動と散乱効率の関係

密度揺動 $\tilde{n}$ が存在する場合のプローブビームと散乱波の散乱効率 $P_s/P_i$ は、有効散乱体積 $V$ 中に一様に密度揺動 $\tilde{n}(\boldsymbol{k}, \omega)$ が存在する場合、$r_0$ を古典電子半径、散乱体積中心から観測点までの距離を $R$ とすると

$$P_s/P_i = 4\pi \frac{r_0^2}{R^2} [\tilde{n}(\boldsymbol{k}, \omega)]^2 V^2 \tag{1}$$

と表せる。したがって、プローブビームの周波数の選択は、直接散乱効率には影響せず、空間分解能を決定するビームサイズや散乱角によって決まる散乱体積 $V$ を介して依存することになる。加熱波動の伝搬電力 $P_{\mathrm{H}}$ と振動電場の関係は

$$P_{\mathrm{H}} = \omega \epsilon_0 \frac{\tilde{E}_{\mathrm{H}}^{\ 2}}{2} \tag{2}$$

と表され、電荷の保存則 $\frac{\partial(e\tilde{n})}{\partial t} + \boldsymbol{\nabla} \cdot \boldsymbol{j} = 0$ と電子バーンスタイン波の分散関係から加熱振動電場 $\boldsymbol{E}_{\mathrm{H}}$ とそれに伴う電子密度揺動 $\tilde{n}$ が決定されるので、最終的に散乱効率は、

$$P_s/P_i = 8\pi \frac{r_0^2}{R^2} V^2 \left( \frac{e^2 n_{\mathrm{e}}^2}{\epsilon_0 \omega k^2 T^2} \right) \left\{ 1 - \Lambda_0(\beta) - \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{\omega}{\omega - n\Omega} \left[ 1 - W\left( \frac{\omega - n\Omega}{|k_{\|}|(T/m)^{1/2}} \right) \right] \Lambda_n(\beta) \right\}^2 \tag{3}$$

と表される。ここで、$k_D$ はデバイ波数、$W$ や $\Lambda_n, \beta$ は、参考文献 [1] の表式を用いた。以上のように、プローブビームとして300-400 GHzを選択しても、全散乱効率には依存せず、入射・受信配位から予想される散乱角と計測可能な波数の関係が決まることが解った。ただし、この選択は、入手可能なプローブビームの発振源とその帯域での検出システムの構成に大きな影響を及ぼす。具体的な配位、プラズマパラメータ等を用いた検討は今後の課題である。

参考文献

[1] S. Ichimaru, ”Basic Principles of Plasma Physics” *Addison-Wesley Publishing Co. Inc. 1980.*

# テラヘルツ波を用いた高温プラズマ計測法の開発

核融合科学研究所・ヘリカル研究部　　徳沢季彦

## 1. 目的

核融合発電を目指した高温プラズマ閉じ込め研究において、近年高密度化が進んでいる。そのため従来マイクロ波帯の電磁波を用いていた反射法などのプラズマ計測手法へのテラヘルツ波帯への拡張が必要となってきている。例えば、核融合科学研究所で検討を行っているヘリカル型原型炉(FFHR-d1)で想定しているプラズマ内部の特性周波数はマイクロ波からテラヘルツ波(0.1-10THz)領域に拡がる。この空間および周波数領域を全てカバーする計測システムの構築が期待されている。しかしながら、プラズマ計測に適した光源がこれまで非常に限られていたことから、この分野の計測手法は開発がまだあまり進んでいない。そこで、近年新しく開発がなされてきたテラヘルツ波光源を用いた高温プラズマ計測法の早急な確立が期待されている。

本研究では、これまでに実績のあるマイクロ波計測法のテラヘルツ波領域への拡張を行うことを目指してその基盤を確立するための開発研究を行う。本研究の測定対象物体は、従来の物性研究で用いられてきたテラヘルツ波計測では事例のないサイズと物体である、メートル級の大型高温プラズマであるため、これへの適用を目的としたミラーやアンテナ等の伝送光学系や信号処理等の回路系を含めたシステムの設計および開発を行う。

## 2. 計画と実験方法

核融合科学研究所の大型ヘリカル装置ＬＨＤでは、これまで種々のマイクロ波帯の反射計、散乱計などを適用しプラズマ計測を行ってきた実績があるが、本研究では、100～1000ＧＨｚの周波数帯で２つの種類の光源を用いた新しい計測システムの開発を行う。一つはマイクロ波帯発振器出力を逓倍する方法、もう一つは時間領域分光法で用いられるテラヘルツ波パルスを活用する方法である。前者は周波数掃引を行うことで電子密度の空間分布情報を求めるためのシステム開発を W-band を対象として行う。平成 26 年度の実験において、初めて反射信号を受信することができた。背景雑音や偽反射信号から真の信号抽出を行うアルゴリズム処理の開発が必要で、現在解析中である。一方、後者はパルスの持つ周波数空間の広帯域性を活用した計測を行うが、ｍｍ～ｃｍサイズの物体の物性研究には実績があるが、大型の物体の研究に用いられた例は無いため、そのための開発研究を行う。本年度は時間応答性についての試験を行ったので、以下に述べる。

## 2. 時間応答性の高めた飛行時間型パルスレーダ計測手法

パルス計測におけるデータ取得法として、発振ジッタの影響を軽減するため、発振に同期しかつ遅れ時間を追加したタイミング信号を用いて、信号を取得するサンプリングデータ取得法がある。これを用いて多数の周波数成分を連続波として計測する場合、遅れ時間を生成する機構が重要で、マイクロ波帯であればこれを電気的に処理できるが、テラヘルツ帯では通常これを機械式ステージを用いて行うことが一般的であった。しかしこれではプラズマ計測に必要とする時間応答を満たせない。そこで、今回これに対応するため、非同期サンプリング法の特性試験を行った。

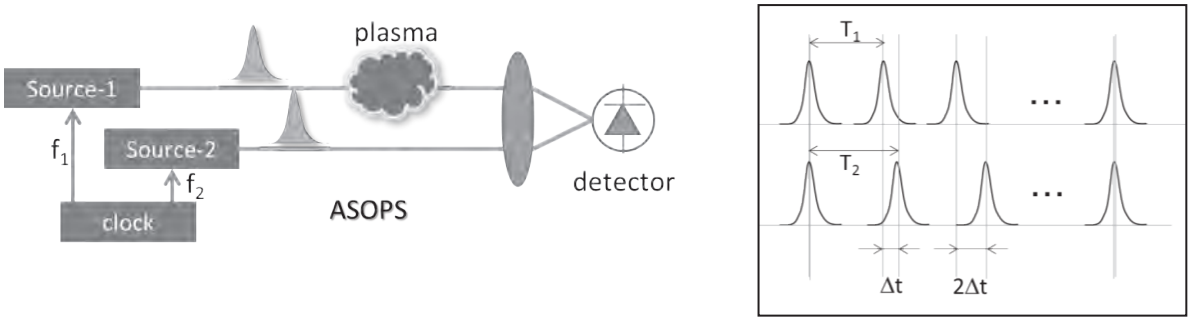



図 1　非同期サンプリング法の概略図（左）とタイミングチャート（右）

図 1 に非同期サンプリング法の概念図及びそのタイミングチャートを示す。2 つの光源をわずかに周期をずらして発振させることにより、検出器上ではビートが形成される。このビート波形の包絡線は、元の光源から発振波形をダウンサンプリングしたものとなる。通常のサンプリング手法で波形を取得するのに比べ数桁の高い時間応答が得られる。図 2 に、100kHz および 99kHz で 2 台のパルスジェネレータ（PSPL-2000）を発振させ取得したビート信号を示す。200ns のパルスを約 3 桁落として観測できることが分かる。

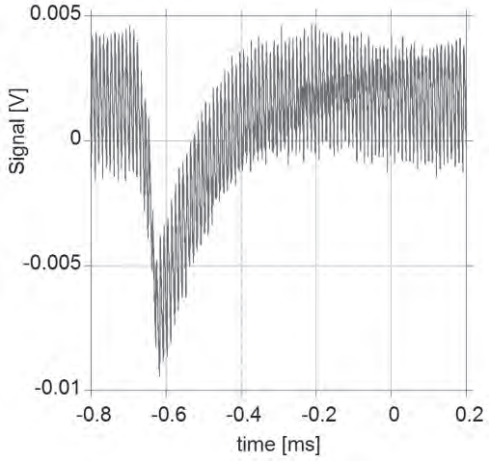



図2　非同期サンプリング法で求めた伝送パルス信号波形

この非同期サンプリングの原理を用いたテラヘルツ波時間領域分光システムを用いたプラズマ計測試験を行った。図 3 に計測配置を示す。13.56MHz の RF 波動により生成した ICP プラズマを光ファイバ接続の光伝導アンテナを介してテラヘルツ波計測を実施した。プラズマ有無による位相の変化量を 1 計測 8ms の時間応答で計測しそれを 4096 回分平均化したものを図 4 に示す。今回の実験では電子密度が薄く、本テラヘルツ波システムでは有意な差が得られなかったが、信号観測はできておるので、今後より高密度化し計測実証を目指す。

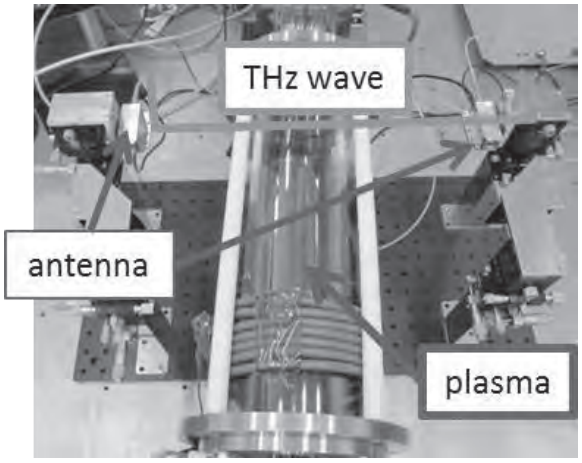



図 3　非同期サンプリング法によるプラズマ計測テストシステム

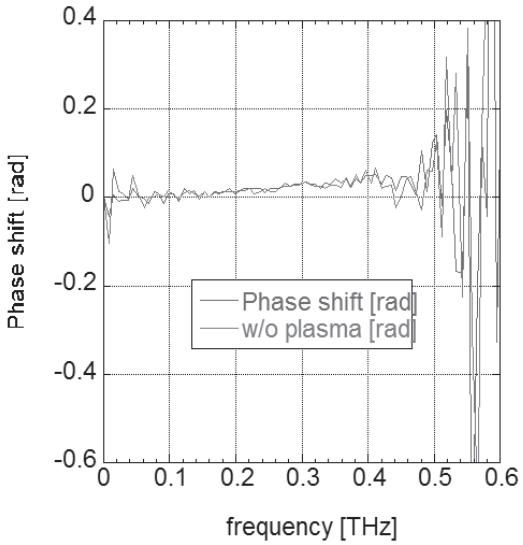



図 4　周波数に対する位相変化

# 26 FP-1

高エネルギーイオン照射によるタングステン中の照射欠陥回復温度依存性と水素同位体滞留ダイナミックス

静岡大学大学院 理学研究科　大矢恭久

【目的】

核融合炉のプラズマ対向壁には、水素同位体滞留量の少ないタングステン(W)の利用が考えられている。しかし、プラズマ対向壁はDT核融合反応により生成した中性子を含む高エネルギー粒子に曝されることにより、照射欠陥が形成し水素同位体が安定的に捕捉されると報告されている。また、照射欠陥は熱により安定化するとともに、拡散して回復する等の複雑な挙動が予想される。核融合炉の定常運転のためには、熱影響を考慮した欠陥状態と水素滞留量評価が必要不可欠である。そこで本研究では鉄イオン照射したWを各温度まで焼鈍した後、透過型電子顕微鏡(TEM)観察により照射欠陥の熱による成長、回復挙動について評価を行った。さらに、同様の試料に重水素イオンを照射し昇温脱離(TDS)測定を行ない、欠陥状態と重水素滞留挙動相関を明らかにすることとした。また、各照射損傷量まで鉄イオン照射したWを用いて1173 K加熱実験を行うことで、欠陥回復挙動と重水素滞留挙動におよぼす影響についても明らかにした。

【実験】

試料としてアライドマテリアル社製の歪取加工済の多結晶W(10 mm$^{\Phi}$, 0.5 mm$^{t}$)を用いた。不純物除去のため加熱処理を1173 Kにて30分間行った後、照射損傷を導入するため日本原子力研究開発機構高崎量子応用研究所の3MVタンデム加速器(TIARA)にて$Fe^{2+}$を室温にて損傷量0.1 dpaまで照射した。その後、九州大学応用力学研究所のTEM装置を用いて、試料中の照射損傷を観察した後、573, 873, 1173 Kにて30分間焼鈍し、同様にTEM観察を行うことで、欠陥回復挙動の観察を行った。さらに、同様にダメージを導入したWを静岡大学にて573, 873, 1173 Kにて30分間焼鈍し、重水素をエネルギー1.0 keV $D_2^+$にてフラックス$1.0\times10^{18}$ $D^+$ $m^{-2}$ $s^{-1}$、フルエンス$1.0\times10^{22}$ $D^+$ $m^{-2}$まで室温にて照射し、TDSにて重水素滞留挙動を明らかにした。

また、$Fe^{2+}$を室温にて損傷量0.01 - 1.0 dpaまで変化させて照射したWを1173 Kまで加熱した後、TEM観察および$D_2^+$照射、TDS測定を行った。

【結果および考察】

図1に室温にて$Fe^{2+}$照射したW試料を各温度にて焼鈍した後に$D_2^+$照射した際の重水素放出スペクトルを示す。重水素の放出はPeak 1(400 K付近)、Peak 2(600 K付近)およびPeak 3(800 K付近)の3つの放出ピークに分けられた。Peak 1は表面吸着された重水素および転位ループに捕捉された重水素の放出、Peak 2は原子空孔からの重水素放出[1]、Peak 3はボイドからの重水素放出[2]とそれぞれ帰属した。

図2に各Peakにおける重水素滞留量をまとめた。焼鈍温度の上昇によりPeak 3における重水素滞留量が減少した。これは焼鈍によってW原子の再配列が

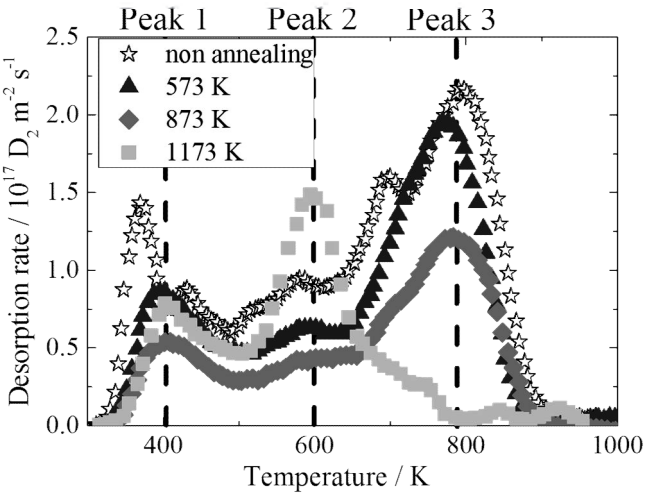



図1　各焼鈍試料における$D_2$ TDSスペクトル

起こりやすくなり、ボイドが回復したためであると考えられた。一方で、Peak 1 における重水素滞留量は焼鈍温度が上昇してもほとんど変化がないことが示唆された。

図 3 に各温度で焼鈍した試料の転位ループの TEM 写真を示す。転位ループは 573 K にて集合を開始し、大きく成長後、1173 K までの加熱でほとんど消滅した。転位ループが回復しているにもかかわらず、Peak 1 における重水素滞留量がほとんど減少しないことから、転位ループに捕捉される重水素滞留量が少ないために転位ループの回復による重水素滞留挙動への影響が小さいことが示唆された。

図 4 に、各損傷量まで $Fe^{2+}$照射した後 1173 K まで加熱した W における重水素放出スペクトルを示す。損傷量が減少するにつれてボイドからの放出ピークは低温側にシフトした。0.1 dpa においてボイドにおける放出ピークは消滅し、原子空孔の放出ピークが見られ、0.01 dpa では原子空孔およびボイドによる重水素滞留は見られなかった。このことから、欠陥密度が高い場合欠陥同士の集合頻度が高くなり回復よりも成長するが、欠陥密度が低くなると大きな欠陥は回復途中で分解し原子空孔のような小さな欠陥となることが示唆された。

これらの結果から、焼鈍による欠陥の回復は W 中の重水素滞留量の減少を引き起こし、その主な要因はボイドの回復によるものと考えられる。

[1] H. Eleveld *et al., J. Nucl. Mater.* **191** (1992) 433
[2] O.V. Ogorodnikova *et al., J. Nucl. Mater.* **415** (2010) 661

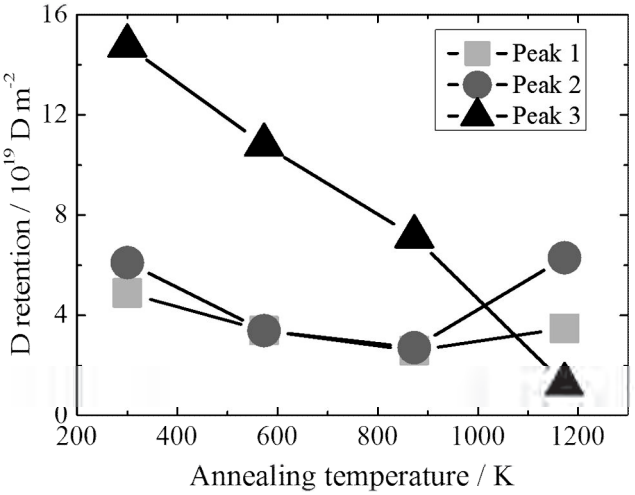



図 2 各 Peak における重水素滞留量変化

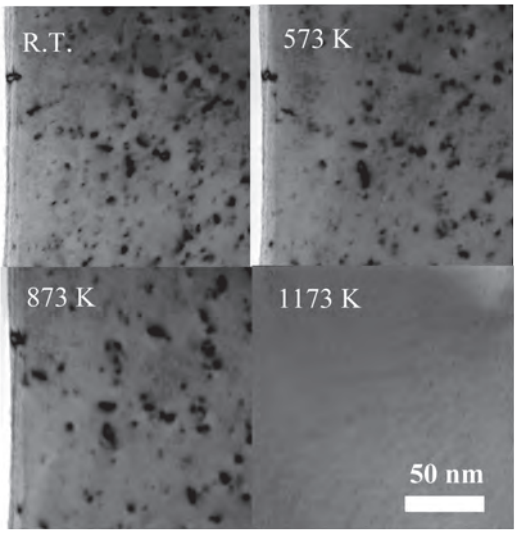



図 3 各温度における TEM 写真

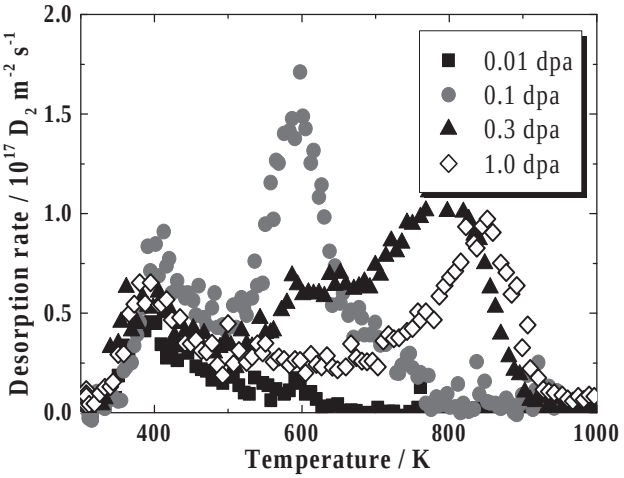



図 4　各損傷量導入(1173 K 焼鈍)試料における $D_2$ TDS スペクトル

# 26 FP-2

## 真空プラズマ蒸着したタングステンの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　谷口修一、奥西成良、韓　文妥、木村　晃彦

### １．目的

核融合炉のダイバータ・ブランケットでは、耐熱負荷特性や耐スパッタリング特性に優れ、さらに水素同位体リテンションの少ないタングステン（W）を低放射化構造材料の表面に被覆・接合し、アーマ材として使用することが期待されている。しかし、W と代表的な低放射化構造材料であるフェライト鋼の接合・被覆については、両者の熱膨張係数が大きく異なるため、熱疲労による破壊を考慮した適切な界面強度設計が必要である。真空プラズマ溶射（VPS）法は、金属粉末を溶射することで、材料表面を異種金属などで覆う被覆法であり、VPS-W を第一壁として採用するブランケットの設計もあるが、VPS-W そのものの諸特性については不明な点が残されている。そこで本研究では、低放射化材料に VPS 法を用いて作製したタングステン被覆材そのものの強度特性評価および微細組織観察を実施し、第一壁材料としてより優れた VPS-W を作製するための金属組織学的因子を明らかにすることを目的とする。

### ２．研究成果の概要

**１）W 溶射法**：本実験での W 溶射は、トーカロ株式会社でスルザーメテコ社製の装置を用いて真空プラズマ溶射(VPS)法で行った。溶射システムは、スルザーメテコ社製 A-2000V タイプで、溶射ガンは F4VB 型である。基板材料には ODS 鋼と F82H 鋼を用いた。基板温度の調整は、プラズマジェットと基板材料との距離を変化させることによって行っている。より良い製膜を行うためには、基板温度を高くすることが有効であることが分かっている。しかし、それぞれの材料には、求められている機械的特性を維持できる最高温度が決まっている。これまでの研究において ODS 鋼では 1510 K において機械的特性が変化しないことが確認されている。また F82H については、製造時に 1013 K で焼き戻し処理を行っているためそれ以上の温度では組織が変化する。よって W 溶射時には基板温度をこれらの温度より十分に低くする必要がある。

**２）マスキング法**：本実験では、2 種類の溶射法を採用した。大きな違いは、溶射時の基板温度、タングステン粉末粒径、グラファイトマスクの有無である。本実験では W 粉末溶射時にグラファイトマスクを用いたものを「VPS-W(M)」、グラファイトマスクを用いないで溶射したものを「VPS-W(NOM)」と呼称する。「VPS-W(NOM)」では、溶射時に溶融した W 粉末が積層するまでに再凝固し被膜表面に堆積する。この再凝固粒が多い層では気孔が多く形成され、熱伝導率に影響を与えることが分かっている。これを改善するため、再凝固粒を遮断する目的でグラファイトマスクを用いた。溶射の概略図を図 1 に示す。グラファイトマスクは溶射ガンの中心から、Y 軸方向に 20mm 離れた位置に設置している。これは+25 mm 以上の範囲に堆積する W 粉末で再凝固粒の割合が高いためである。それぞれの方法で ODS 鋼と F82H に W 粉末を溶射した接合体の機械的特性評価を行った。

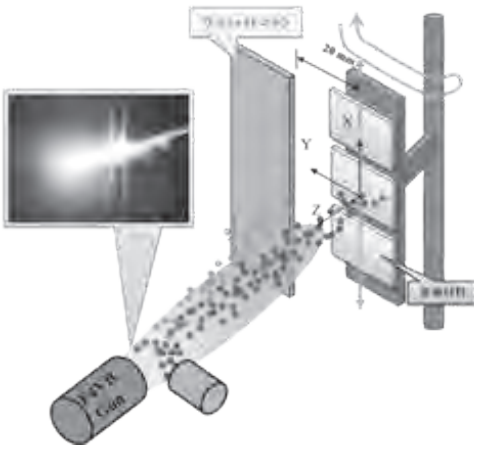


**図 1：W 溶射の概略図（グラファイトマスク装着時）**

3）接合体の強度と密度の関係

微小 3 点曲げ試験の結果、すべての接合体の破断は VPS-W 内で発生していた。破断位置を観察するため試験後樹脂埋めを行い、振動式自動研磨装置 Vibromet2(ビューラー社製)を用いて 1 時間研磨を行った。VPS-W 内に発生した亀裂は、VPS-W の層境界に沿って発生していることが分かった。また柱状粒が伸びている部分には亀裂は発生していない。また、亀裂の進展が VPS-W の層境界に沿って起こっていることが分かった。VPS-W の機械的特性評価では、亀裂は柱状粒に沿って進展していた。また、破断強度においても VPS-W(M)で 400MPa 程度であったが、接合体では VPS-W(M)で 100MPa 前後であり大きな違いが認められた。よってこれらの違いは、VPS-W の破断と、接合体における VPS-W の破断が異なっていることを示している。

接合体の破断強度は、VPS-W(M)で大幅に改善している。図 2 に相対密度と接合体の破断強度との関係を示す。この図から密度が上昇することで強度も上昇していることが分かる。よって、VPS-W の密度が接合体の破断強度に影響を与えていることが分かる。

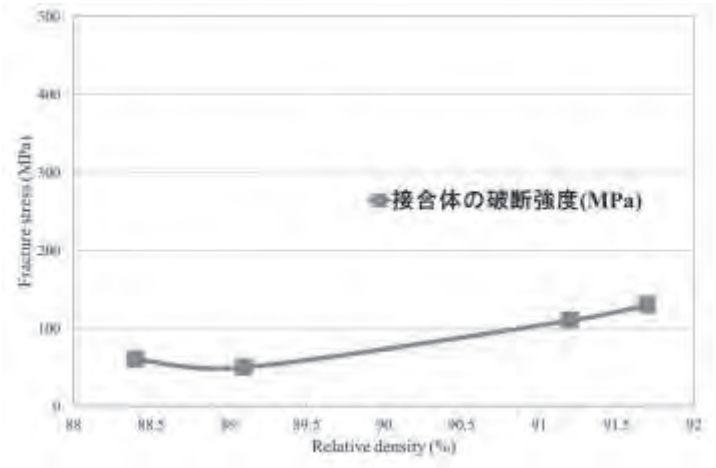



**図 2**：相対密度と接合体破断強度の関係

VPS-W(M)ではグラファイトマスクによって再凝固粒を遮断している。これにより溶融した W 粉末のみが基板材料まで到達する。さらに、溶射 W 粉末粒径を 37μm と大きくしていることで保持できるエネルギーが大きくなり、加えて基板温度も上昇させている。これらの理由から、VPS-W(M)では基板に到達した後も溶融状態を長時間維持することができる。よって W 同士の密着性が良くなると考えられる。密着性が上昇すると柱状粒の割合が高くなることが分かっている。さらに、4 種類の VPS-W の層の厚さを 5 カ所で測定し、平均を求めた結果、両基板材料ともに VPS-W(M)で約 4.1μm、VPS-W(NOM)で約 2.0 μm となり、VPS-W(M)層の方が厚くなっていることが確認できた。よって柱状粒の数が増加し、大きく成長することで亀裂の進展が起こりにくくなり強度が改善したと考えられる（図 3）。層が VPS-W(M)において厚くなった原因としては溶射時の W 粉末粒径の違いと、基板材料へ到達後の冷却速度の違いが考えられるが、断定するにはさらなる調査が必要である。

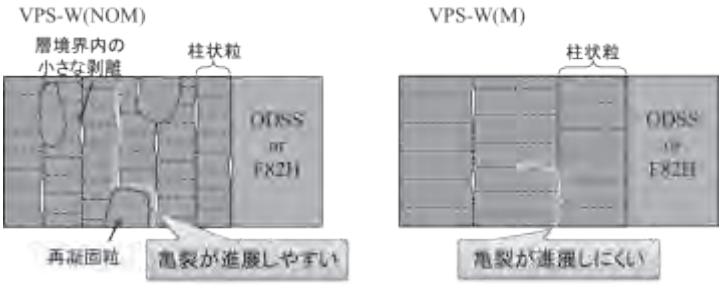



図 3　接合体での亀裂進展　概略図

接合体の微小 3 点曲げ試験より、VPS-W(M)で大幅な破断強度の改善が確認できた。一方で、すべての接合体が VPS-W 内の層境界に沿って破断していた。このことから本実験の破断強度は VPS-W 内の剥離強度である。すなわち接合界面の強度は本実験の破断強度より高いと考えられる。今後、高温域での評価も必要である。

## ４．成果発表

奥西成良、能登裕之、谷口修一、韓　文妥、木村晃彦：高熱負荷を受けたタングステンモノブロック冷却構造体の組織観察、核融合エネルギー連合講演会、2014 年 6 月 19-20 日、つくば国際会議場

奥西 成良、能登 裕之、谷口 修一、韓　文妥、木村晃彦：高熱負荷を受けた W-モノブロック冷却構造体の組織観察、日本原子力学会、2014 年 9 月 8-10 日、京都大学

奥西成良、能登裕之、谷口修一、韓 文妥、木村晃彦:高熱負荷を受けた W-モノブロック冷却構造体の組織観察、日本金属学会、2014 年 9 月 24-26 日、名古屋大学

# 26 FP-3

## カスケード損傷下における空孔型欠陥のクラスター形成に及ぼす共存水素同位体の影響

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

原子炉材料および核融合炉材料は高エネルギー中性子の照射を受けカスケード損傷を生じる。また、原子炉材料中には冷却水から発生した水素が、核融合炉材料中には燃料である重水素とトリチウムが浸入する。照射損傷と水素同位体のいずれもが材料を脆化させるが、両者が共存する場合の相互作用についてはわかっていない部分が多い。応用力学研究所の高エネルギーイオン発生装置は重イオンと水素同位体イオンの同時照射を実施できる世界でもユニークな装置であり、この分野での貢献が大きく期待される。本研究の目的は重イオンと水素同位体イオンの同時照射によりカスケード損傷組織の発達に及ぼす共存水素同位体の影響を明らかにすることであるが、今年度はそれに先立ち、重イオン単独での照射実験を行い微細組織観察した。試料には近年照射損傷導入後の水素同位体挙動が活発に調べられているタングステン（W）を用いた。また、欠陥濃度の一つの目安として、照射後に重水素（D）を導入し照射欠陥に捕獲されたD濃度を測定した。

### ２．実験

供試材にはGoodfellow社製の純W板材(純度99.95%)を用いた。直径3 mmの薄膜試料を調製したのち、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室温あるいは600℃で2.4 MeVのCuイオンを0.5 dpa(損傷ピーク深さでの値)まで照射し、微細組織を同様に応用力学研究所の透過電子顕微鏡(TEM)で観察した。また、10×10×0.5 mmの板状試料を調製し、250、500、800、1000 ℃にて6.4 MeVのFeイオンを0.5 dpa（損傷ピーク深さでの値）まで照射した。そののち0.1 MPaの$D_2$ガスに400℃で10時間曝露し、捕獲されたD濃度を核反応法（NRA）で測定した。Feイオン照射には京都大学の加速器DuETを用い、NRA測定はドイツ　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実施した。

### ３．結果および考察

2.4 MeVのCuイオンを室温あるいは600 ℃で0.5 dpa照射したWのTEM明視野像を図1に示す。黒いコントラストが格子間原子あるいは原子空孔が集積して形成された転位ループである。600 ℃で照射した場合には転位ループが大きく成長すると共に、密度が低下している。これは高温では格子間原子や空孔、特に室温ではほとんど動かない空孔の拡散が活発になり長距離拡散するためだと考えられる。図2は同様の試料をアンダーフォーカスにて観察した像で、ボイド（空孔集合体）の観察を試みたものである。室温で照射した場合にはボイドが明確には観察されなかったが、600℃で照射した場合にはいくつかを矢印で例示したように直径1 nm程度のボイドが多数見られた。転位ループの場合と同様に、600 ℃では空孔の長距離拡散が活性化したため集合体の形成が進展したものと考えられる。図3では、250～1000 ℃においてFeイオンで0.5 dpaまで照射したのち$D_2$ガスに曝露した試料の損傷領域中の捕獲D濃度を照射温度に対してプロットしている。照射温度の増大と共に捕獲D濃度が減少しており、1000 ℃で照射した場合には250 ℃の約1/3となっている。これらの結果をまとめると、この温度領域では照射温度の上昇に伴い照射欠陥の集積が進みより粗大な集合体が低密度に形成されるようになり、結果として水素同位体の捕獲サイトとして働く欠陥の密度が低下するものと考えられる。

水素同位体は空孔型欠陥とクラスターを形成することが知られている。照射中に水素同位体が共存す

ると、クラスターの形成を通して空孔型欠陥の拡散に影響を及ぼす可能性があり、上述の微細組織がどのように変化するか大変興味深い。

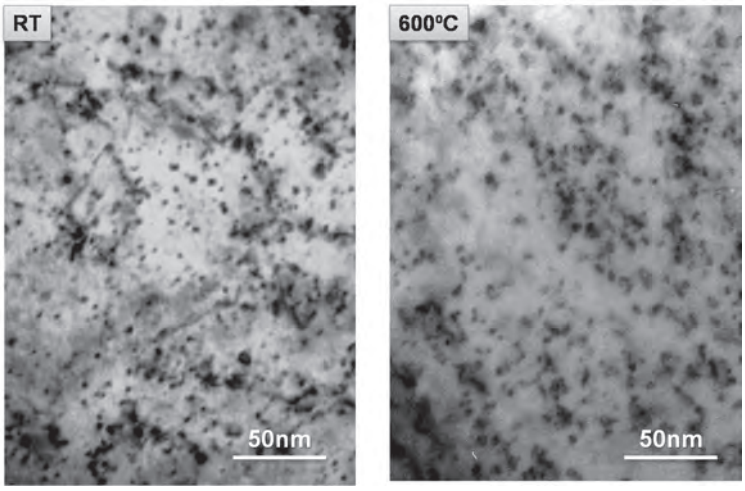



図 1 室温（左）および 600 ℃（右）で 2.4 MeV の Cu イオンを 0.5 dpa 照射した W の TEM 明視野像.

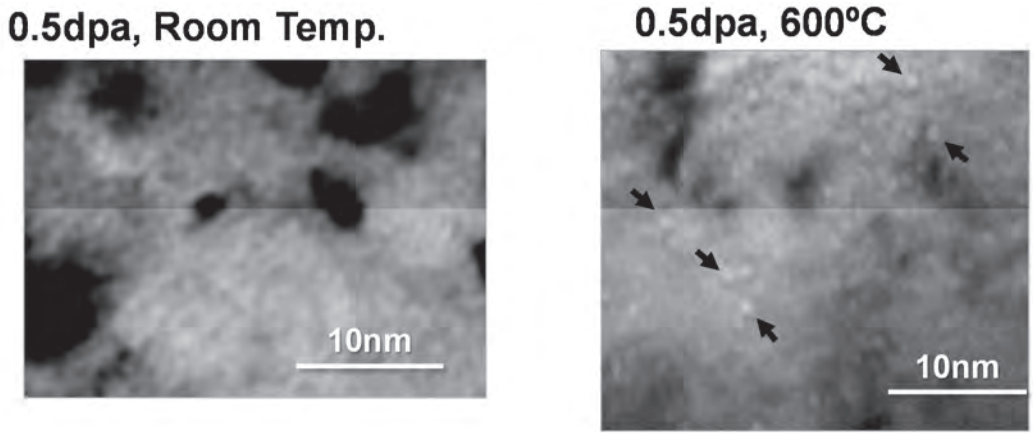



図 2 室温（左）および 600 ℃（右）で 2.4 MeV の Cu イオンを 0.5 dpa 照射した W の TEM 明視野像（アンダーフォーカス）.

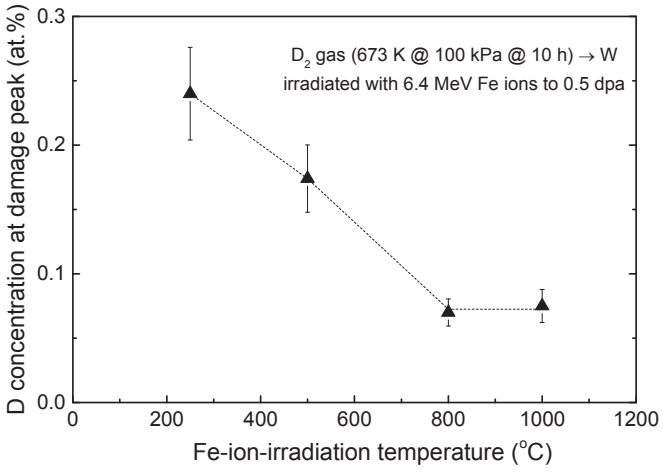



図 3　6.4 MeV の Fe イオンを 0.5 dpa 照射したのち 400℃で 0.1 MPa の $D_2$ ガスに 10 時間曝露した W 試料の損傷領域中の捕獲 D 濃度（損傷ピークでの値）.

学会発表

1) Y. Hatano, V. Kh. Alimov, N. Yoshida, H. Watanabe, M. Oyaidzu and T. Hayashi, “Surface Morphology of F82H Reduced Activation Ferritic/Martensitic Steel Exposed to High Flux Deuterium Plasma”, 12th International Workshop on Hydrogen Isotopes in Fusion Reactor Materials, June 2 - 4, 2014, University of Toyama, Toyama, Japan.
2) Y. Hatano, V.Kh. Alimov, N. Yoshida, H. Watanabe, M. Oyaidzu, T. Hayashi, “Surface morphology change and sputtering of F82H reduced activation ferritic/martensitic steel and Fe by low-energy high-flux deuterium plasma”, Plasma Conference 2014, November 18-21, 2014, TOKI MESSE Niigata Convention Center, Niigata, Japan.

# ヘリウムイオン/プラズマ照射したタングステンにおける ヘリウムバブル形成挙動の系統的観察

島根大学大学院総合理工学研究科　宮本光貴

## 1. はじめに

将来の核融合炉においては，燃焼プラズマを定常的に取扱い，壁材料は反応生成物の高エネルギーヘリウムを含む多様な粒子負荷および過酷な熱負荷に絶え間なく曝されることが予想される．特にヘリウムは，材料欠陥との相互作用が極めて強く，ヘリウムイオン照射やプラズマ曝露が表面特性に著しい影響を及ぼすことが示されている．この表面特性の変化には，表面直下に形成するヘリウムバブルが主要な役割を担うと考えられるが，様々な条件下におけるヘリウムバブルの形成とその成長過程に関連した系統的な研究は成されていない．そこで本研究では，多様な条件下でヘリウム照射/曝露したタングステン試料を用いて，ヘリウムバブルの形成挙動（密度，サイズ，深さ分布）を，照射条件（照射量，エネルギー，温度）の関数として評価することを目的とした．

## 2. 実験方法

本実験では，㈱ニラコ社製の粉末焼結タングステンを予め$\phi$3×$^{t}$0.1 mm$^3$に形成後，再結晶熱処理を施し試料として用いた．ジェット研磨により薄膜加工した試料を，イオン照射装置直結型透過顕微鏡により，室温から 1273 K の温度範囲における一定温度で 3 keV-He$^+$(~2.5×10$^{17}$m$^{-2}$s$^{-1}$)イオン照射下その場観察を行った．

## 3. 結果および考察

図 1 は室温から 1273K の範囲の一定温度で，3 keV-He イオン照射下でのタングステンの微視的損傷発達過程を示した．いずれの温度においても，照射量の増加に伴い，明瞭なバブル形成が観察されている．また，照射温度の増加に伴い，より低照射量からバブルが観察され始める傾向が確認された．これは空孔やヘリウム-空孔複合体の移動が，高温により活発になりバブルの核形成が促進されたものだと考えられる．図 2 には，これらの観察から得られたバ

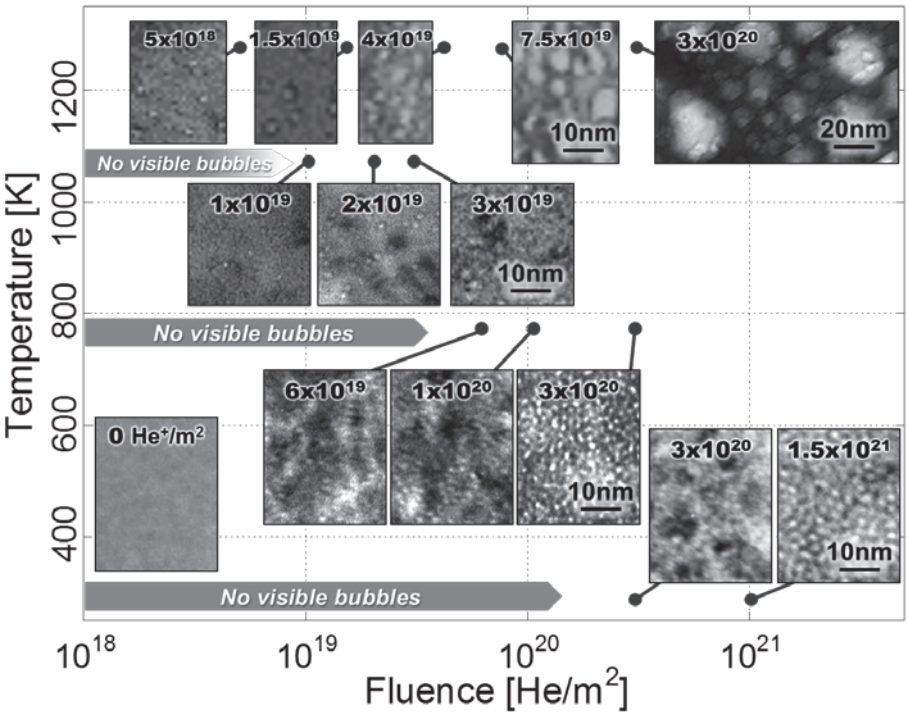



図 1　室温から 1273K の一定温度下で 3 keV-He イオン照射したタングステンの微視的損傷発達過程（TEM 像）．

ブル密度，およびサイズの照射量依存性を示す．本実験範囲においては，1073K 以下の照射温度ではバブルの急激な成長は観察されず，1-2nm 程度のサイズに留まり，密度も飽和傾向を示した．一方，1273K で照射した試料においては，バブルの連続的な成長と，$10^{20}$He/m$^2$ 以上の照射量における密度の減少が確認された．また，1273K における照射下その場観察では，隣接するバブル同士の合体成長や，比較的大きなバブル(~10nm)の表面での消失が観察された．これらの結果は，1273K 以上の照射温度では，バブルが移動を伴い成長していることを示している．

現在，同様の条件下で照射したタングステン試料を集束イオンビーム(FIB)加工により断面薄膜化し，断面組織観察に取り組んでいる．バブルの深さ分布も含めて，データを整理する予定である．また，本実験ではバブルの明確な長距離移動は観察されなかったが，今後，照射条件の拡張，および高純度試料の利用等により，バブルの動的挙動の実時間観察を行い，移動のメカニズムや関連する移動エネルギーの評価を行う予定である．

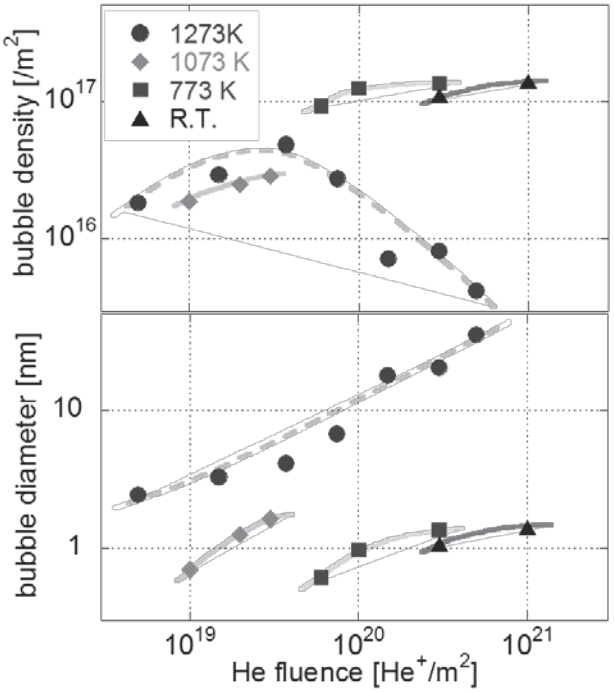



図 2　一定温度照射下でタングステン試料中に形成したヘリウムバブルの密度(上)，およびサイズ(下)の照射量依存性．

- **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准教授）
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：　飯島信行，田中徳人，三上 聡（島根大学大学院総合理工学研究科博士前期課程）

26 FP-5

# プラズマ対向材料中の水素同位体交換に関する研究

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粒子の照射をダイバーターと呼ばれる部位で受ける構造になっている。そこで、ダイバーターは融点が高く水素（水素同位体）をほとんど溶解しないタングステン(W)で表面を被覆し保護する予定である。それでも強い照射によって水素が侵入し貯蔵されることが懸念されている。特に、トリチウム(T)は放射性同位体であるためその残留量の上限が法令でも規制されている。また、崩壊熱の影響も問題視されている。そこで、タングステン中に貯蔵される水素に関する研究が始まった。水素のタングステンへの溶解熱は原子１個当たり1.2eV(吸熱反応)と金属では最も高く、結晶格子に水素が直接残留することはない。しかし、空孔型の格子欠陥など原子レベルの隙間には捕獲される。そこで、密度汎関数法に基づいた第一原理計算を行いタングステン空孔と水素との結合エネルギーの計算が行われている[1)]。

タングステン空孔中の水素の安定構造は通常のBCC金属とは異なる特異な構造になることがわかった[2)]。さらに、水素は軽い原子であるため零点振動エネルギーが大きく、原子の質量に依存する同位体効果が顕著とも考えられる。本研究では水素の振動数を計算し同位体効果について研究した。また、水素雰囲気下では空孔の超多量生成が起こる可能性がある。タングステン空孔を生成するためには3.1eVのエネルギーが必要であるが、空孔水素複合体を生成することで大幅に生成エネルギーが減少し、場合によってはマイナスになることもある。そうなると、空孔が自発的に発生し大量の水素吸蔵と材料強度の低下の原因になる可能性がある。本研究では平衡状態を仮定した熱力学的モデルに基づき、この水素による空孔の超多量生成に関する研究も行った。同位体効果に関する研究では、二種類の水素同位体が共存する時の空孔による水素の捕獲量の違いを求めた。

**【計算方法】**

水素の安定構造や空孔との結合エネルギーの計算には、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。計算セルはBCC格子の6×6×6(432格子点)という大きなものを使った。後述するように格子振動のエントロピーを計算するためである。ポテンシャルはGGAタイプのPBEポテンシャル、K点の密度は2×2×2、原子緩和は各原子に働く力のが 0.003 eV/Å 以下になるまで緩和を繰り返した。水素の零点振動エネルギーは水素原子の変位と復元力が比例することを仮定した調和近似で計算した。

熱力学的モデルはヘルムホルツの自由エネルギー $F=U-TS$ を使って空孔密度などを計算した。内部エネルギー$U$は第一原理計算から求めた空孔の生成エネルギーと水素の結合エネルギーで構成されている。エントロピー$S$は配置と格子振動のエントロピーで構成されている $S=S^{com}+S^{vib}$。配置のエントロピーとは空孔や水素を結晶格子のどこに置くかの場合の数$W$を求めボルツマンの式 $S^{com}=k_B \ln W$から計算される。振動のエントロピーは空孔の存在による格子振動の乱れに由来する。特に、振動のエントロピーの計算に重点を置いたので後で詳しく述べる。

**【計算結果】**

図1のようにタングステン空孔中の水素は他のBCC金属とは異なる特異構造を持つ。(a)鉄など多くのBCC金属空孔では水素はO-siteと呼ばれる対称性の高い場所の近傍が安定で最大6個まで捕獲されるが、b)タングステン空孔内では水素は歪んだ構造になる。さらに、タングステン空孔には最大12個まで水素が捕獲される可能性がある。

図2ではタングステン空孔と各水素同位体の結合エネルギーを示す。軽い同位体の方が空孔とは強く結合して、いわゆる同位体効果は明確である。また、零点振動エネルギーの計算には図1で示したような正しい水素の構造に関する情報が不可欠である。本研究によって初めて正しい同位体効果の研究が可能になったことを強調しておく。

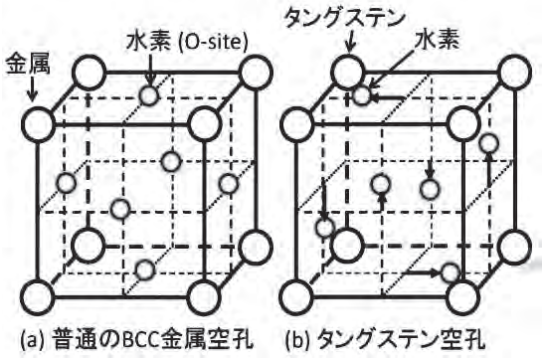



図1:金属空孔中の水素6個の安定構造。(a)鉄など普通のBCC金属結晶(b)タングステン空孔中の特異な構造。

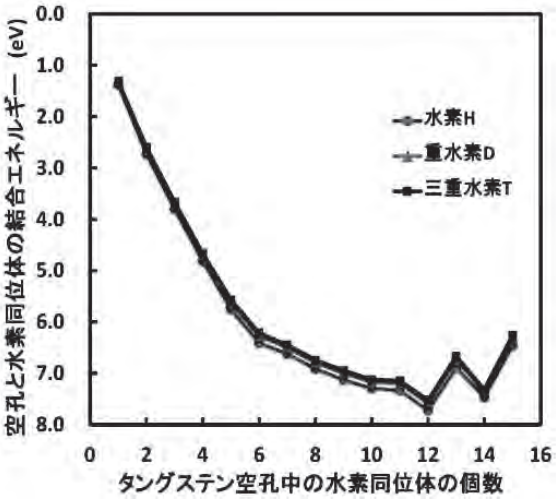



図2:水素同位体ごとのタングステン空孔と水素の結合エネルギー。

**【熱力学的モデルによる空孔の超多量生成の計算】**

空孔が水素の影響で自発的に形成される場合を研究した[3]。生成する空孔水素複合体の個数は平衡状態を仮定した熱力学的モデルによって計算した。ここでは振動のエントロピー$S^{vib}$への寄与について詳しく述べる。振動のエントロピーは空孔水素複合体が存在することで格子振動に起きる乱れに由来している。水素を$k$個捕獲した空孔水素複合体を$VH_k$とし、その振動のエントロピーへの寄与を$P_k$とする。$VH_k$が$n_k$個存在すると

$$S^{vib} = k_B \sum_k n_k \ln P_k \qquad P_k = \prod_i \nu_i / \nu'_{ki}$$

である。ここで$i$は$VH_k$近傍のタングステン原子の通し番号、$\nu_i$は完全結晶の$\nu'_{ki}$は$VH_k$によって変調を受けた格子振動である。欠陥から十分遠方では格子振動は完全結晶のものに漸近するので振動のエントロピーには寄与しなくなる。

BCC格子では点欠陥から第一近接原子は8個、第二近接原子は6個、それ以降は12個、24個、8個、6個となる。それぞれの近接原子グループごとに完全結晶との格子振動数の比を計算したのが図3である。第一と第二近接原子グループでは$VH_k$による格子振動の変調が顕著である。しかし、第六近接グループになると格子振動はほとんど欠陥からの影響を受けない。本計算では第五近接原子までエントロピーの計算に考慮した。

自由エネルギーを極小にする状態が実現するので、空孔水素複合体$VH_k$の個数に関して次の式が成立する。

$$\partial F / \partial n_k = 0$$

図4は水素濃度(原子数比)と温度に対する空孔水素複合体濃度の関係である。(a)は水素の零点振動の影響を無視したモデル、(b)は水素(H)の零点振動の影響を考慮したモデルである。詳細な点は違うが両者は共通点も多い。水素低濃度の極限では通常の熱平衡空孔濃度に一致する。また、水素濃度が上昇するとある閾値から急に空孔濃度が増加する。高水素濃度では空孔中に水素が6個捕獲された$VH_6$が大量に生成される。

**【水素同位体が共存する時の空孔による水素の捕獲量】**

二種類の水素同位体が共存する状態を研究した。ただし、こちらのモデルでは空孔は照射などの外的要因で導入されることを想定し一定であることを仮定する。例としてタングステンに対して空孔濃度が$1\times10^{-4}$であり、HとDが共に$5\times10^{-3}$の濃度である時に空孔に捕獲されるHとDの量を示す。図5によると、空孔にはHの方が多く捕獲される。特に低温になるほどその差は大きくなる。一方でDの空孔による捕獲量は温度によらずほぼ一定である。結合エネルギー(図2)より空孔と強く結合するHの方が空孔に多く捕獲されることが予想されたが、その通りになった。さらに図5をみると空孔がDを捕獲するのをHは阻害しているようにみえる。

**【まとめ】**

タングステン空孔に捕獲される水素は特異な構造を持つ(図1)ために、零点振動エネルギーの計算にはそのことを反映しなければならない。水素同位体ごとのタングステン空孔との結合エネルギーを計算したところ軽い同位体ほど結合が強いという同位体効果がみられた(図2)。熱力学的モデルには内部エネルギーと配置と振動のエントロピーの影響を考慮した。空孔水素複合体の生成(図4)や二種類の同位体が共存する場合の空孔への捕獲量を計算した(図5)。同位体による相違点(同位体効果)が明確にみられ、軽い核種の方が空孔に捕獲されやすい。この結果は炉壁材料から三重水素を回収する技術への応用が期待される。

**【研究組織】**

研究代表者　山口正剛、　所内世話人　大澤一人

参考文献
[1] K. Ohsawa et al., Phys. Rev. B 82 (2010) 184117.
[2] K. Ohsawa *et al.*, Phys. Rev. B 85 (2012) 094102.
[3] K. Ohsawa *et al.*, J. Nucl. Mater. 458 (2015) 187.

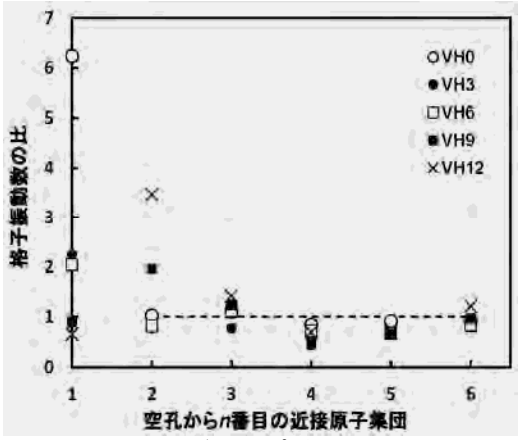



図3：近接原子グループごとに計算した振動数の比。空孔水素複合体$VH_0$、$VH_3$、$VH_6$、$VH_9$、$VH_{12}$の例を記載。

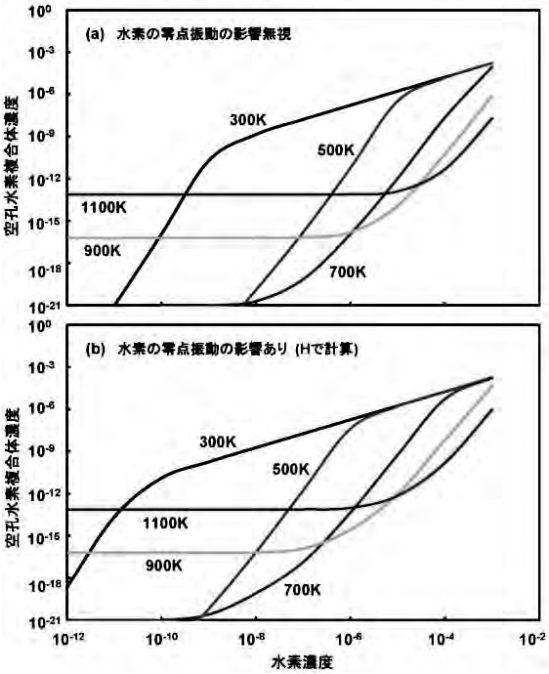



図4：水素濃度と温度に対する全空孔水素複合体(空孔)の濃度。(a)水素の零点振動の影響を無視、(b)影響を考慮。

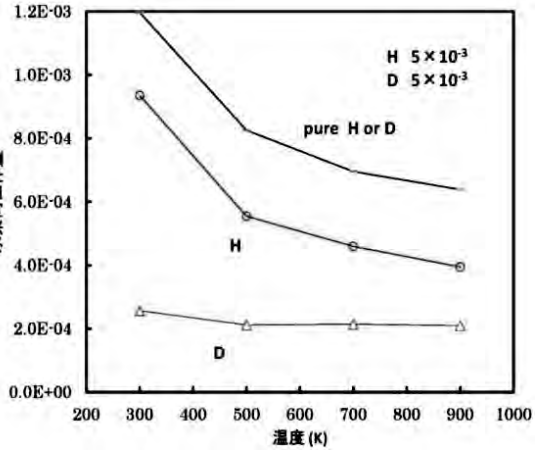



図5:空孔濃度が$1\times10^{-4}$でHとDの濃度が$5\times10^{-3}$の時に空孔に捕獲されるHとDの量。

26 FP-6

# 金属間化合物における空孔型欠陥と水素原子の相互作用に関する研究

大阪府立大学　堀史説

## 【研究の背景】

金属間化合物は複数の合金元素からなり、特定の結合により形成する化合物の配列に規則性があり、化合物としての特徴を持つ合金である。このような金属間化合物の中に水素との相互作用が重要なものがある。核融合炉で用いられるプラズマ対向材料(タングステン系合金)や水素吸蔵合金、水素雰囲気下での水素脆化の問題などである。水素との相互作用は合金種、組成や構造等によって多様な特徴がある。その中でも本研究が注目するのは構造欠陥を含む空孔型欠陥による水素の捕獲や吸蔵現象である。空孔型欠陥は照射環境下では非平衡欠陥として多量に導入されるので、核融合や原子力材料の分野では重要な課題である。特に、化合物を形成している合金では空孔種は多様であるが、熱平衡では特定の欠陥が安定構造をとる場合が多い。しかし、照射環境で導入される非平衡欠陥は照射条件によってはランダムに生成し、非平衡な状態で水素と相互作用した場合には、従来の熱平衡状態で議論されてきた欠陥状態とは異なる挙動を示す可能性が高い。これまでの第一原理計算においては、B2構造のFeAl合金において、熱的安定性の低いアルミニウム単一空孔に対する複数個の水素原子の捕獲が計算されているが、従来の本合金における欠陥の研究はそのほとんどが熱平衡状態のもであるため、非平衡な欠陥状態とは異なる。そこで本研究では金属間化合物の主に非平衡状態での欠陥への水素捕獲サイトや捕獲状態および移動拡散に関する知見を得るために、空孔型欠陥に敏感な陽電子消滅法による水素の分析を行い、実験結果と理論計算との比較による詳細な水素の状態評価を行なうことを目的としている。また、1原子レベルでの水素の検出は実験的には非常に難しいため、陽電子消滅の計算機シミュレーションと実験との対比により、より詳細な解析をすすめる。そのため本年度は、密度汎関数法にもとづく第一原理計算による水素の安定構造計算と、非平衡欠陥での陽電子消滅の計算機シミュレーションプログラムの構築し、それらの異なる欠陥種での陽電子消滅について比較検討した。

## 【陽電子消滅計算】

電子-陽電子対消滅の計算方法には、M.J.Puskaらのsuperinposed atom methodを適用した[1]。結晶全体の電子分布はモデル結晶中の原子に各々Herman-Skillmanが求めたFeおよびAl原子の電子分布（動径波動関数）を用い[2]、これにより結晶中での陽電子が感じるポテンシャルをクーロン相互作用（Vc : Coulomb part）と、電子-陽電子間の相関ポテンシャル（Vcorr : correlation part）との和で表す。相関ポテンシャルはBronski と Nieminenによって報告されている内挿公式を用いた[3]。以上により、FeAl中で陽電子の感じるポテンシャルを決定した。次に、密度反関数理論に基づいて結晶中での陽電子の波動関数を求めた。陽電子の波動関数はコーン-シャム方程式から数値緩和法を用いた数値計算によって解くことができる。上で求めたポテンシャルをシュレディンガー方程式に代入し、メッシュ分割した空間を変分法により解き、エネルギー固有値を求め、陽電子の波動関数を得た。その際に、結晶の全空間での波動関数の積分値が1になるように規格化した。求めた陽電子の波動関数から陽電子の消滅確率を求め、その逆数から陽電子寿命を決定した。計算に用いたモデルは

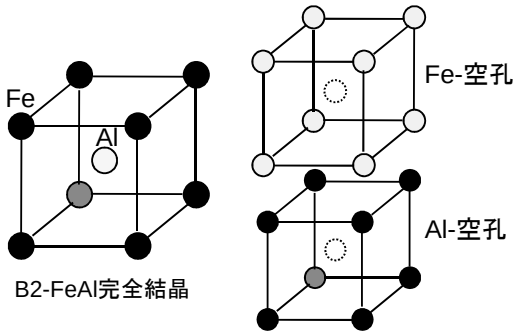



図1：陽電子消滅計算に用いたB2-FeAlモデル結晶格子

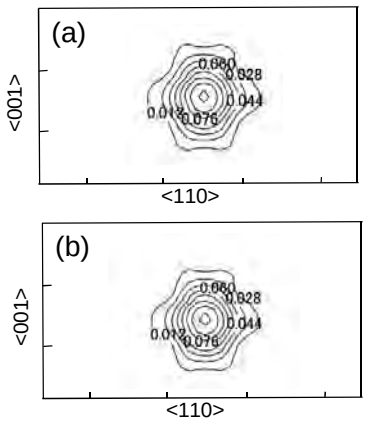



図2：単一空孔での陽電子の波動関数の分布
(a) Fe-空孔、(a) Al-空孔

3a×3a×3aの格子中にB2構造となるような格子位置にFe原子とAl原子を導入し、モデル結晶とした。このモデル結晶に対してメッシュ間隔a/10で計算を行った。

**【計算結果】**

図2にはそれぞれ単一のFe-空孔、Al-空孔をモデル結晶内に作成し、陽電子を入れた際の陽電子は導関数の広がりを示す。完全結晶の場合は、陽電子は結晶全体に広がって分布（ブロッホ状態）するが、単一空孔ではいずれの空孔タイプでも空孔位置に陽電子が局在しており、計算により陽電子が空孔に局在することがわかった。また、グラフからは空孔種に依存した顕著な波動関数の違いは見られなかった。一方、これらの空孔の中心に水素原子を1個配置して同様に陽電子の波動関数を計算したところ、空孔のみでは空孔位置に強く局在していた陽電子が、いずれも周囲の格子間にやや広がることがわかった（図3,4）。これは、空孔の中心位置に水素を配置したために、陽電子と水素の斥力が働いたためであると考えられる。また、これらの水素を配置した空孔では陽電子波導関数の分布にも顕著な違いは見られなかった。そこで、これらの波動関数から求めた陽電子寿命値について比較する。表1に、各種空孔での陽電子消滅寿命計算結果を示す。水素を含まない空孔では鉄空孔の方がAl空孔に比べ、およそ10psecほど高い値を示すことがわかった。実験で確認されている空孔寿命はこれらの中間的な値であり[4]、これは本計算が緩和を考慮していないことを考えると、熱平衡で鉄空孔が優先的に生成するとされる報告とも一致しており[5]、空孔単体の状態では陽電子によりこれらを識別可能であることがわかった。また、水素を中心に配置したV-Hの場合、空孔種に依存せず値は同じで、完全結晶に近い値まで下がった。これは、今回の計算では水素を格子位置に配置したことにより、ほぼ完全結晶と同じ位置に原子が配置されたためと考えられるが、実際の配置は第一原理計算では中心の格子位置とはずれた位置で安定性が高いことがわかり、水素の数を増やしても中心位置には存在しないことがわかった。そのため、今後は第一原理計算での安定配置を取り入れた陽電子計算に展開する必要がある。

**【まとめ】**

今回の計算で、B2型FeAl合金中の空孔種は陽電子にて同定可能であり、特に照射などにより非平衡に導入された空孔の形態の特定に繋がることが示唆された。また、水素との相互作用については、緩和を取り入れた安定構造計算を行う必要があり、現在計算している安定配置を今回構築した陽電子計算プログラムへ取り込んで陽電子計算を行うとともに、H26年度に実施した電子線照射した試料の陽電子消滅測定および解析結果との比較検討を今後実施する。

**【研究組織】**

堀　史説　（大阪府立大学、研究代表者）
大澤一人　（九州大学応用力学研究所、所内世話人）
上野陽平　（大阪府立大学、研究協力者）

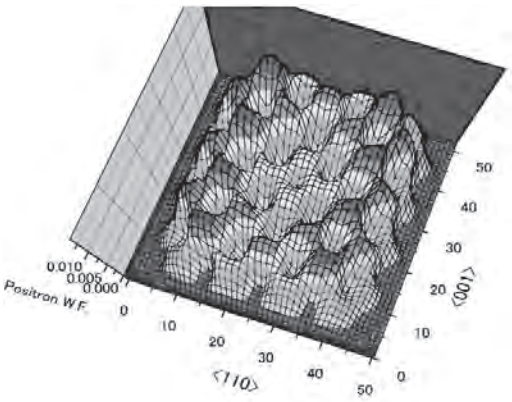



図3：水素原子をFe単空孔中心に配置したFeAl合金での陽電子波動関数

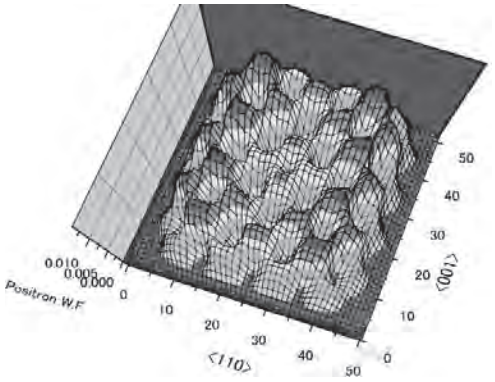



図4：水素原子をAl単空孔中心に配置したFeAl合金での陽電子波動関数

表1　B2-FeAl合金中の陽電子寿命の計算結果

| | 陽電子寿命(ps) |
|---|---|
| 完全結晶 | 112 |
| $V_{Fe}$ | 195 |
| $V_{Fe}$ + H | 113 |
| $V_{Al}$ | 182 |
| $V_{Al}$ + H | 113 |
| V (実験値) | 187[4] |

## 参考文献

[1] M.J.Puska, R.M.Nieminen; J.Phys. F: Met.Phys, vol.3, 20 (1991) 3455.
[2] F.Harman, S.Skillman ;Atomic Structure Calculations, Prentice Hall Inc.
[3] E.Boronski, R.M.Nieminen; Phys. Rev. B346 (1986) 3820.
[4] T.Haraguchi, F.Hori, R.Oshima and M.Kogachi; Intermetellics 9 (2001) 763.
[5] T.Haraguchi, M.Kogachi, S.M.Kim; Intermetellics 6, 6 (1998) 499.

26 FP-7

# 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

原子力・核融合分野において様々な機器構造材料として用いられている Fe 基合金の、照射環境下での脆化機構の解明と非破壊評価法の検討が求められている。それらを効率的に進める研究手法として、①重イオン照射：中性子照射と似たカスケード損傷が生じる一方、放射化せず試料が扱い易い、②単結晶薄膜：試料全体が損傷し解析が容易、③磁気計測：非破壊評価への応用の可能性、の3つを組み合わせた研究を進めている。高温環境下で二相分離により脆化が生じるとされる Fe-Cr 合金に着目し、膜厚 30nm の Fe-20%Cr 単結晶薄膜を 475℃でイオン照射した結果、磁気ヒステリシス曲線の保磁力の増加を確認し、二相分離の照射促進を磁気的に捉えたと考えている[参考文献1]。これまでの実験では、試料作製の制約から膜厚の薄い単結晶合金について調べてきた。実材料に与える照射効果を考える上で、さらに膜厚の厚い試料の作製と照射実験が必要である。このような考えに基づき、膜厚 180nm の Fe-20%Cr 単結晶膜を作製し、成膜中の詳細な構造評価を実施するとともに、磁気ヒステリシス特性に与える重イオン照射効果を調べた。また、並行して膜厚 330nm の純鉄単結晶を作製して重イオン照射を行い、陽電子$\mu$プローブを用いた陽電子寿命測定を行った。

## 方法

超高真空中で電子ビーム蒸着により試料を作製した。MgO(001)基板上に室温で Fe-20%Cr 合金を成膜し、180nm 積層後、600℃で 10min 熱処理を行った。成膜および熱処理時には、反射高速電子線回折（RHEED）観察を行い、結晶構造・薄膜形態を観察した。その後、タンデム型加速器（九大・応力研）を用いて、照射温度 3 条件（室温、290℃、475℃）で 2.4MeV の $Cu^{2+}$イオンを照射した（照射量 : $1.2\times10^{18}$ 個/$m^2$）。未照射材と照射材のそれぞれの磁気ヒステリシス特性を VSM により測定した。並行して膜厚 330nm の純鉄単結晶薄膜を作製し、室温と 290℃で $Cu^{2+}$イオン照射をした後、陽電子$\mu$プローブ（産総研）で陽電子寿命測定を行った。

## 結果および考察

図 1 に RHEED 観察の結果を示す。Fe-Cr 薄膜は膜厚が薄い段階では MgO(001)と膜面内で 45 度回転した Fe-Cr(001)が成長した（図 1(a)）。ところが膜厚が厚くなると、Fe-Cr(001)に加えて Fe-Cr(221)の双晶ドメインが島状成長することを確認した（図 1(b)）。この成長挙動は、純鉄でも同様に確認された。この種の報告はこれまでに無く、その成長機構の解明には成膜条件を系統的に変えた実験がさらに必要であるが、原因の一つとして MgO(001)基板のステップに起因して生じる厚さ方向の格子整合性が関係すると考えている。一方、600℃で熱処理すると(221)の回折パターンは消え、(001)のみのストリーク状パターンとなった（図 1(c)）。

図 2 に磁化測定の結果を示す。保磁力は、未照射材でも保時温度が高くなると小さく、照射によ

りさらに減少する傾向が見られた。これは、膜厚 30nm の Fe-20%Cr 単結晶薄膜の 475℃重イオン照射[参考文献 1]および Fe-20%Cr バルク材の 290℃中性子照射[成果報告 1]で見られた、保磁力増加と挙動が異なる。本実験では膜厚が厚い場合、成膜時に(221)双晶ドメインが成長した。成膜直後の熱処理により双晶ドメインは消失したと考えているが、何らかの残存欠陥組織が照射により回復することで保磁力が低下した可能性がある。残存欠陥組織の存在を示唆する結果として、未照射の膜厚 330nm の純鉄単結晶薄膜で陽電子寿命が長いことが確認している[成果報告 2]。今後、(221)成長の影響を排除した試料の検討が必要である。

**参考文献**：[1] Y. Kamada, H. Watanabe, S. Mitani, J. N. Mohapatra, H. Kikuchi, S. Kobayashi, M. Mizuguchi, and K. Takanashi: Ion-irradiation Enhancement of Materials Degradation in Fe-Cr Single Crystals Detected by Magnetic Technique, J, Nucl, Mater. 442 (2013) S861-864.

**成果報告**：[1] 兜森達彦, 鎌田康寛, 小林悟, 三谷誠司, 渡辺英雄, “Fe-Cr2 元合金の磁気ヒステリシス特性に与える照射効果”, 日本金属学会東北支部第 30 回研究発表大会, 講演概要集 p16, 岩手大, 盛岡, 2014.12.10

[2] N. Oshima, Y. Kamada, H. Watanabe, A. Kinomura and R. Suzuki, Development of Combinatorial Defect analysis with an Intense Positron Microprobe, JJAP Conf. Proc. 2 (2014) 011306/1-10. 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

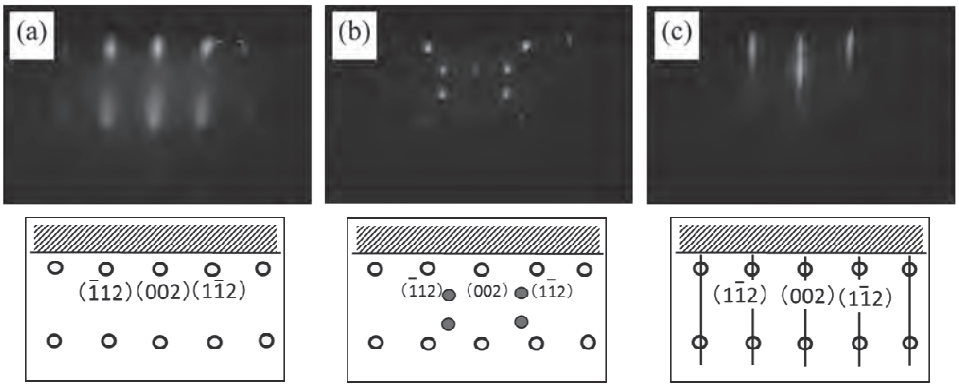



図 1 Fe-20%Cr 合金薄膜の成膜中の RHEED 観察。[100]MgO 入射。
(a) 10nm 積層後、(b)100nm 積層後、(c) 180nm 積層後に 600℃アニール

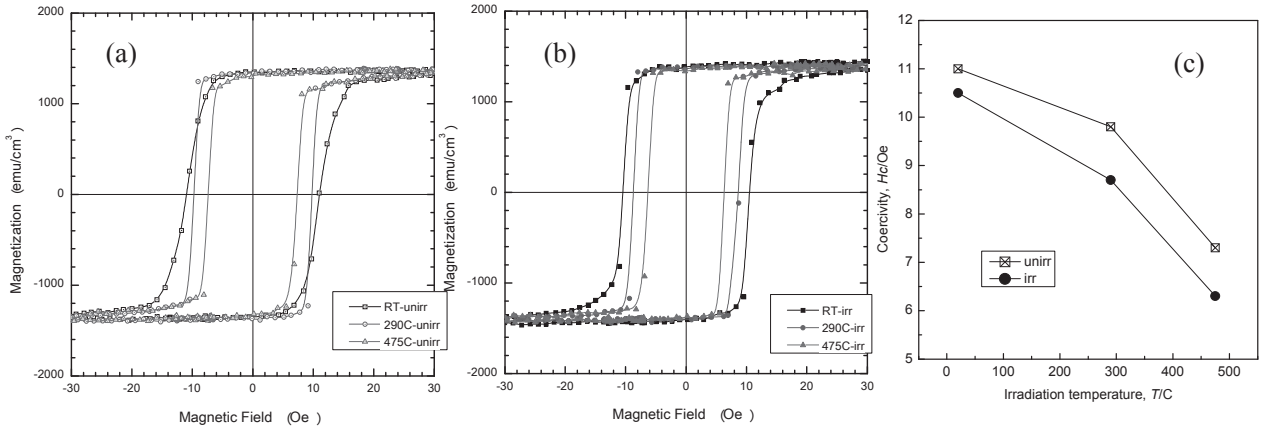



図 2　Fe-20%Cr 合金薄膜の磁気特性に与える重イオン照射効果
(a)未照射試料および(b)照射試料の M-H 曲線、(c)保磁力の照射効果

# 電子ビーム照射による材料表面の高エネルギー密度入射損耗開始閾値の評価（第２報）

応用ながれ研究所、レーザー技術総合研究所
糟谷 紘一

目的

応用力学研究所の電子ビーム熱負荷発生装置を用いて、諸材料表面を照射し、電子天秤を含む計測装置等により、表面損耗量（喪失総質量）を測定する。同時に、レーザー変位計等を用いて、３次元表面損耗状態を観測する。例えば、熱負荷量（Ｘ座標）の関数として、損耗深さの最大値や、喪失総質量を（Ｙ座標）表示し、データフィッティング線を描く。この線を座標原点方向に内挿することにより、熱負荷量の損耗開始閾値を評価する。粗さの影響が小さい、十分大きな変数量側から、粗さ程度の変数量に向かってデータ内挿を行うことにより、初期粗さ等が損耗閾値評価結果に及ぼす悪影響を除くことができる。種々のサンプル材料を照射して、閾値等の比較により、高熱負荷下における諸材料の表面強度（損耗耐力）を定量的に評価する。

異なる入射強度の電子ビームによる評価結果や、各種のレーザービーム照射による評価結果を、既に多く蓄積しているので、これらと、本共同研究結果の比較を行う。これらが本共同研究のあらましであるが、現在、電子ビーム装置が修理中であるので、本年度はサンプル材料のレーザー照射を準備した。内容の中心は、タングステンコートしたダイヤモンド（複合）層による、高エネルギー密度入射下装置壁の損耗破壊に起因する各種装置の破壊予防モニターの提案と、その初期実験結果の報告である。

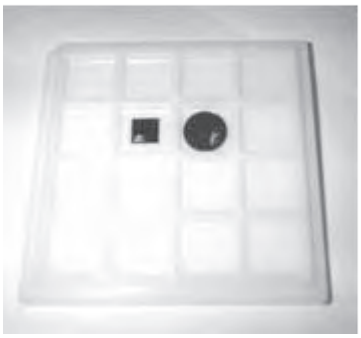
厳しい環境下にある内壁検査のための変位計光学モニターの提案

厳しい環境下に置かれる構造物の代表的なものは、核融合装置の観測窓、第１壁、リミター、ダイバーターなどの、いわゆるプラズマ対向壁である。昨年度の本研究成果報告書には、WやSiCの耐力測定結果を書いたが、市販の多結晶CVDダイヤモンドの耐力も、我々の以前の研究で、明らかになっている。そこで、ここでは、一例として、タングステンコートのダイヤモンド（複合材料）層を、同じく市販の表面変位計と組み合わせた損耗計測利用・炉壁破壊防止監視モニターを提案する。

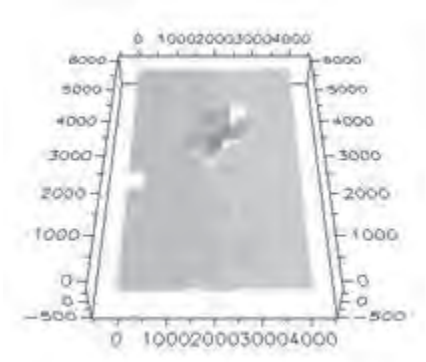
タングステンによるモニターヘッドの表面コーティング

エルミネット社に依頼して、ターボスパッターコーターによる英国製多結晶CVDダイヤモンド円板（直径8mm）のタングステンコーティングを行った。コーティング条件は(a)50mAx5分（スピード5.8nm/分x5分）の予備コーティングにより、29nm厚さのコーティングを行い、(b)100mAx60分（スピード11.8nm/分x60分）の708nmの主コーティングを行った。これらの厚さは概算予想値で、実際の厚さ測定は、別所に示す。コーティング後の円板を第１図右側に示す。図中左側の四角形状のものは。別の米国製のものである。両板上には、左下コーナー部と右下コーナー部に、コート層の一部を機械的にはがした切り欠き部がある。これらは、レーザー損耗小穴作成前に、試験的に作成した模擬損耗穴である。

上記のサンプルを変位計により計測した結果、第２図（３次元鳥瞰図例）が得られた。切り欠き部は、ダークアウト領域として観測できた。このようなモニター複合層を核融合装置内壁に面一に設置しておけば、高密度熱入射によるタングステン薄層の損耗が発生する場合に、これを検知して警告を発することができる。ArFレーザーの多重照射による小穴作成模擬実験は、近く実施する予定である。



第１図　タングステンコートしたダイヤモンド板例




第２図　切り欠き付サンプルの変位計測定結果
（３次元鳥瞰図中にブラックアウト穴の観測）

核融合反応炉の安全監視モニター用変位計の候補

監視モニターシステムの１例が、別論文に示してある。上記のようなタングステンコートのダイヤモンドサンプルを、炉壁に面一に設置する。サンプル背後に設置した変位計により、タングステン表面の損耗を監視する。核融合プラズマの高熱流負荷によりタングステン層の一部或いは全部が損耗消失する時、ダークアウト信号の開始をモニターできる。もちろん、ダークアウト以前のタングステン層厚さ減少を観測できる場合には、より早期の警戒信号を発することができる。これにより、炉のメンテナンスに移行することが可能となる。

市販の変位計の中で、当該モニターに使えそうなモデル例として、キーエンス社の以下のものがある。ダークアウト信号のみの観測でよい場合には、SIシリーズ(熱耐力に応じて、SI-F01, SI-F10, SI-F80)がある。より高度の変位計として、タングステン薄層厚さの定量的測定ができるものが望まれる。もちろん、この場合の純タングステン層厚さは、炉壁の大部分を占める場所のタングステン厚さよりもかなり薄い厚さである。この場合、タングステンコートなしのダイヤモンド板を、タングステンと変位計先端部の間に設置し、タングステン損耗小穴等が発生する場合に、炉全体の真空度低下などに伴う稼働の妨げがないようにする。この場合、SI-F80R厚さ計が有用である。但し、現存の厚さ計で測定可能とするには、損耗によりできるクレーター形状に、厚さ計側から見て凹面状態となる部分を含む必要がある。これらの計測ヘッド群とは別に、SI-Tシリーズセンサーヘッド(SI-T10, SI-T80)があるが、これらは、全タングステン仕様の炉壁のごく一部に純ダイヤモンド板を面一に設置したモニターの場合に有効である。もちろん、先と同様に、現存の市販計器を使う場合、観測できるクレーター形状に、上記と同様の制限がある場合に限られる。

謝辞

本研究を進めるにあたり，東工大名誉教授の井関孝好先生、応用ながれ研究所、レーザー技術総合研究所、大阪大学レーザーエネルギー学研究センター、核融合科学研究所、九州大学応用力学研究所、ポーランド・オプトエレクトロニクス研究所、（株）キーエンス、(株) 東海高熱工業、(株) エルミネット　などの方々にお世話になった。

発表資料

[1] K.Kasuya et al., Laser Erosion Diagnostics of Plasma Facing Materials with Displacement Sensors and their Application to Safe Guard Monitors to Protect Nuclear Fusion Chambers, 20th International Symposium on High Power Lasers and Applications, 25.08.2014-29.08.2014, Chengdu, China, Proceedings in print (2015).

[2] K.Kasuya et al., Laser Erosion of Plasma Facing Materials: Observations with Displacement Sensors and Their Applications, レーザ研シンポジウム2015報告書, 平成27年4月8日-9日, 大阪大学・銀杏会館、印刷中 (2015).

# 26 FP-9

## LHD 長時間放電に曝露された金属材料中のヘリウム粒子の吸蔵・放出挙動

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)では，ヘリウムプラズマによる長時間放電の研究が行われている．加熱入力は水素マイノリティの ICH+ECH が用いられており，平成 25 年度の実験においては平均で 1.2MW の加熱入力で $T_{i,e}$~2 keV，$n_e$~$1.2\times10^{19}m^{-3}$のプラズマを 47 分間にわたって維持することに成功している．密度フィードバックの粒子供給制御により，47 分間の放電時間全域にわたってほぼ一定の電子密度を得ることができたが，そのバックグラウンドでは「①壁排気率の動的変化」と「②不純物混入によるプラズマ放電の停止」という 2 つの制御困難な問題を抱えていた．LHD のプラズマ対向壁は 90%以上が第一壁材料であるステンレス鋼(SUS316L)，残りの 5%程度が炭素性のダイバータタイルで構成されている．放電中は第一壁の温度はほぼ室温に保たれている．平成 25 年度までに実施した応用力学研究所との共同研究において，このような対向材料の特徴が①と②の物理に深く関わっていることが少しずつ明らかになってきた．特に注目すべきは，長時間放電中の対向材料表面には，放電中にダイバータタイルや第一壁からスパッタリングされた炭素や鉄の不純物が堆積することで，炭素を主とし，鉄をわずかに含む Mixed-material 堆積層が連続して形成され続けることが示されたことである．この堆積層にヘリウムが吸蔵・放出されることで LHD の長時間放電中の粒子バランス，つまり壁排気の動的変化に影響を与えていることが予想される．また，Mixed-material 堆積層は構造的に脆い性質を有しており，熱負荷や堆積層中に発生するガスバブルの圧力などによって剥離を引き起こし，プラズマ中に混入することが考えられる．このように，Mixed-material 堆積層の構造特性評価とそこに捕捉されるヘリウム粒子の定量評価を行うことで，①と②を引き起こす物理を解明できる可能性がある．今年度の研究では，昨年度得られた上記の知見に対して次のような追加解析を実施した．①では，材料中に捕捉されるヘリウム粒子が実際の粒子バランスに対してどの程度の量であるのかを定量的に比較検討した．②では，堆積層の構造特性をより詳細に解析することで堆積層の剥離機構のモデル化を目指した解析を実施した．

【実験方法】

ステンレス鋼試料を LHD の第一壁位置まで挿入し，「目的」の節で述べたヘリウムの長時間放電に 1000 秒，3389 秒，9980 秒曝露した．取り出した試料表面には Mixed-material 堆積層が形成されており，この試料に対して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)を用いて表面微細構造のナノ観察を行った．また，昇温脱離ガス分析装置(TDS)を用いて捕捉されたヘリウム粒子の定量評価を実施した．昨年度実施した結果も含まれるが，今年度はグローバル粒子バランス解析との比較を行うことで「①壁排気率の動的変化」の機構解明を目指した．また，LHD のダイバータタイルや第一壁に堆積した Mixed-material 堆積層に対しても FIB と TEM を併用した微細構造解析を行い，「②不純物混入によるプラズマ放電の停止」の機構解明を目指した．こちらについても．昨年度実施した結果も含まれるが，より詳細な考察を行った．本報告書では「①壁排気率の動的変化」の機構解明についてのみ報告する．

【結果および考察】

図 1 に LHD 長時間放電に(a)1000 秒，(b)3389 秒，(c)9980 秒曝露したステンレス鋼(SUS)試料とその表面に堆積した Mixed-material 堆積層の断面 TEM 像を示す．曝露時間が増加するごとに堆積層の厚さも増加していることがわかる．また，電子線回折(ED)像から，堆積層の構造はアモルファスに近い微細構造を有していることが明らかになった．加速器を用いたイオンビーム分析の結果から，堆積層の組成は 98%が炭素，2%が鉄で構成されている Mixed-material 堆積層であることが確認された．TEM 像のコントラストから判断して，この堆積層はポーラスな構造であり，空隙を多く有している．このような空隙部がプラズマから入射するヘリウム粒子の捕捉サイトとして機能している可能性が考えられる．

次に，この堆積層にどの程度のヘリウム粒子が捕捉され，その捕捉率は単位時間当たりどの程度であるのかを定量的に求めるための解析を行った．昨年度の TDS 実験結果により，定常長時間放電曝露後の試料では，室温(300K)から 600K までに急激なヘリウムの放出が確認されている．このような室温付近での放出は，弱い捕捉機構であり，大分分が Mixed-material 堆積層に捕捉された，ヘリウムである可能性が高い．そこで，

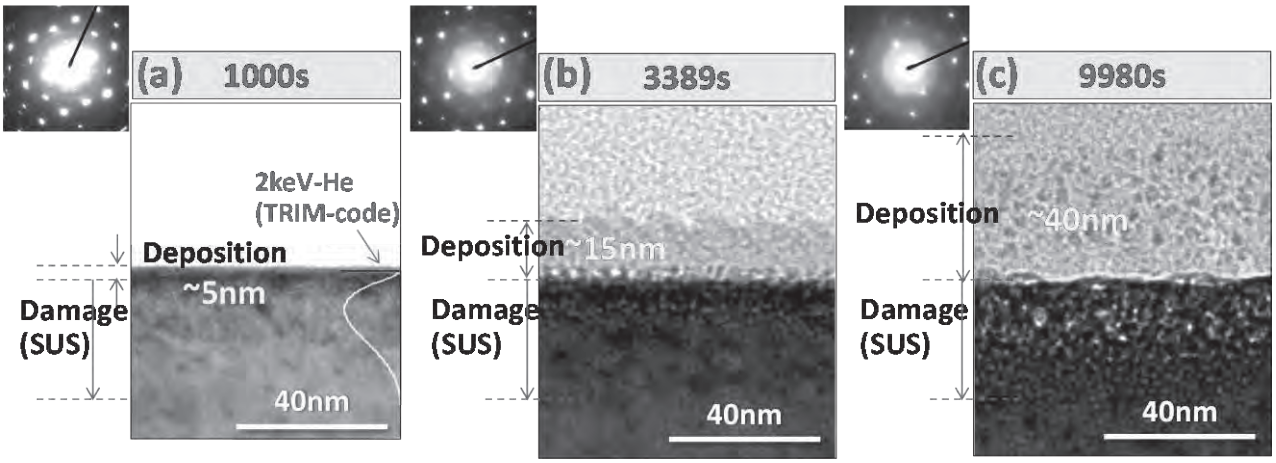



図 1. LHD 長時間放電に(a)1000 秒，(b)3389 秒，(c)9980 秒曝露したステンレス鋼(SUS)試料とその表面に堆積したMixed-material堆積層の断面TEM像. 各TEM像左上に示した図は堆積層とSUS基盤の電子線回折(ED)像.

300-600K までの放出量の積分値を定常放電への試料の曝露時間に対してプロットした図を図 2 に示す. この図より，Mixed-material 堆積層へのヘリウムの捕捉率は堆積層の厚さの増加と共にリニアに増加し，その捕捉量は 10000 秒経過後であっても飽和する傾向が無いことがわかる. これはすなわち，Mixed-material 堆積層が形成され続ける限り長時間放電中のヘリウムの壁排気が飽和することなく継続することを示唆している. 47 分間の放電におけるグローバル粒子バランス解析の結果では[1]，壁排気率($\Gamma_{wall}$)は時間と共に動的に変動することが示されており，その排気率は$\Gamma_{wall}$ ~1.0×$10^{20}$ He/s (0-300s)，$\Gamma_{wall}$ ~-3.5×$10^{18}$ He/s (400-1500s)，$\Gamma_{wall}$ ~1.4×$10^{19}$ He/s (1900-2800s)となる. これに対して，図 2 の材料分析結果から求められる Mixed-material 堆積層へのヘリウムの平均の捕捉率 1.6×$10^{16}$ He/$m^2$s で壁排気率を予測すると，Mixed-material 堆積層が LHD の壁全体の 3/4 (~548$m^2$)に形成されていると仮定した場合，$\Gamma_{wall}$ ~8.8×$10^{18}$ He/$m^2$s と見積もることができる. この値はグローバル粒子バランスで求めた 1900-2800s のときの壁排気率~1.4×$10^{19}$ He/s に近い値である. 本結果より，長時間放電中に発生する壁排気率の動的変化は，壁表面に連続して形成される Mixed-material 堆積層による影響が極めて高いことが示唆される. 今後は，加熱入力がさらに高くなった場合に壁温度がどのように変化し，それに伴う壁排気特性の変化について研究を進めていく必要がある.

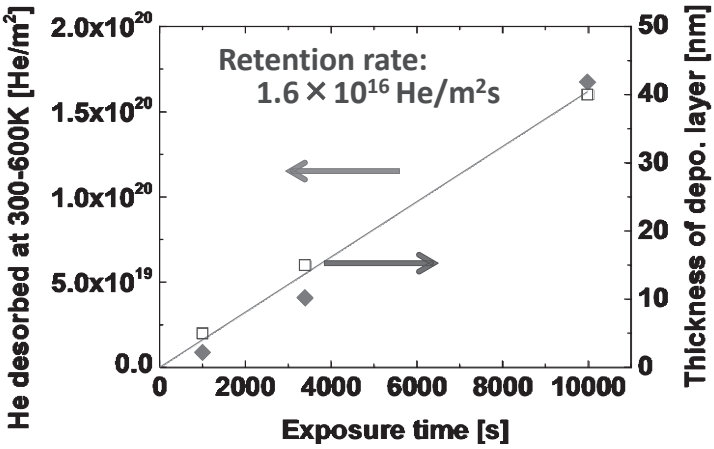



図 2. 照射時間増加に伴う 300-600K における He 放出量と Mixed-material 堆積層の厚さの関係

Reference

[1] G. Motojima et al., J. Nucl. Mater. in press

【成果報告】

M. Tokitani et al., “Plasma wall interaction in long-pulse helium discharge in LHD – Microscopic modification of the wall surface and its impact on particle balance and impurity generation” J. Nucl. Mater. accepted, in press

# 26 FP-10

タングステンの水素吸蔵に対する表面改質効果に関する研究

筑波大学数理物質系　坂本瑞樹

## １．はじめに

プラズマに照射される材料の表面状態は、照射損傷、スパッタリング、再堆積、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、材料の特性を理解する上で重要である。本研究では、低損耗、高融点、低水素吸蔵率という特長から現在注目を集めているタングステン材料に着目し、小型の直線型プラズマ生成装置 APSEDAS 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プラズマ閉じ込め装置 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。本報告では、ヘリウムバブルの効果を中心に報告する。

## ２．実験結果及び考察

タングステン表面へのヘリウムバブル生成は APSEDAS を用いて行われた。通常は試料を冷却ステージにしっかりと固定するが、今回は冷却が効かないようにステージの上に設置した。このタングステン試料（ニラコ社製、厚さ 0.1mm）に対して、フルエンス 4~8 x $10^{25}$ He/$m^2$ 程度ヘリウムプラズマを照射した。ヘリウムのフラックスは約 2 x $10^{22}$ He/$m^2$s であり、エネルギーは約 30 eV であった。また、タングステンの表面温度は、1700 K ~ 1900 K であった。このようなヘリウムプラズマにより生成されたタングステン表面の SEM 画像を図１に示す。表面に数 $\mu$ m 以下の凹凸や筋模様ができていることが分かる。また、FIB 加工と TEM 観測を組み合わせた試料の断面画像を図２に示す。表面直下に約 10nm から 200nm 以下のヘリウムバブルが形成されていることが分かる。

ヘリウムプラズマを照射して、表面にヘリウムバブルを形成したタングステン試料に対して、昇温脱離装置を用いた加熱（昇温速度 1 K/s、最高温度 1173 K）により試料内部のヘリウムの脱離を３回実施した。これにより、800 K 以下でのヘリウムの脱離は観測されなくなった。この試料に対して、APSEDAS を用いて重水素プラズマ照射を行い、その後昇温脱離スペクトル（TDS）測定を行った。

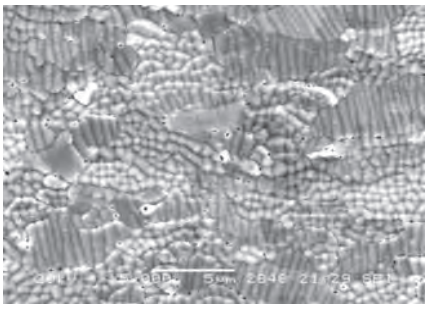


図１　ヘリウムプラズマ照射されたタングステン試料表面の SEM 画像

今回の実験では、同一のヘリウム予照射試料に対し、フルエンスを変えて重水素プラズマ照射とその後の TDS 解析を繰り返し行った。ヘリウム予照射試料に用いた重水素プラズマパラメータは、電子密度が 2~3×$10^{17}$ $m^{-3}$、電子温度が 6～8 eV、空間電位が 20~30 V、フラックスが 2.6~3.0×$10^{21}$ D/$m^2$s であり、プラズマ照射中の試料温度は約 500K であった。重水素プラズマの照射時間は、600 秒～約 14000 秒であり、重水素フルエンスは 1.6×$10^{24}$ ～ 4×$10^{25}$ D/$m^2$

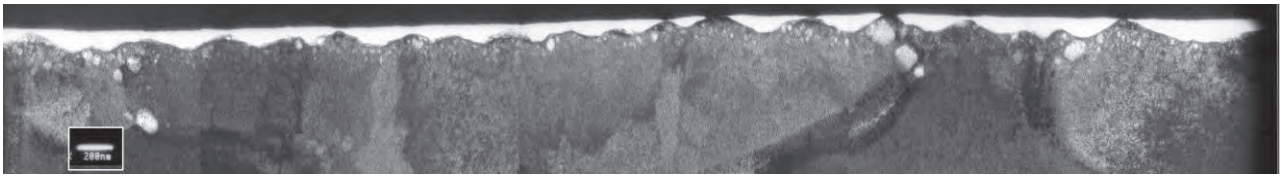


図２　ヘリウムプラズマ照射されたタングステン表面の断面 TEM 画像

である。TDS の条件は昇温速度 1 K/s、最高温度は 750 K である。図 3 に重水素プラズマ照射(フルエンス $1.8\times10^{24}$ D/m$^2$)を行ったヘリウム予照射試料の高分解能 QMS 解析による昇温脱離スペクトル（昇温速度 1K/s）を示す。重水素の脱離が約 600 K 以下で起きているのに対し、ヘリウムの脱離は 1000K 以上で主に観測されている。TDS 中の最高温度が高い場合、材料内におけるバブルの移動(>1300K)や高温側に捕捉されているヘリウムの脱離による特性の変化が考えられるため、実際の TDS 測定では最高温度を低く設定（773K）した。

図４にヘリウム予照射タングステン試料とヘリウム未照射試料に対する重水素リテンションのフルエンス依存性を示す。ヘリウムプラズマを照射していない未照射タングステンの重水素リテンションはフルエンスの約0.5乗で増加するが、ヘリウム予照射試料では、低フルエンス側ではリテンションが未照射タングステンよりも１桁以上高いのに対し、高フルエンス側ではリテンションが飽和傾向にあり、未照射タングステンとほぼ同じ値になっていることが分かる。この現象は、ヘリウムバブル層が、重水素の捕捉サイトになっていることと同時に材料中の重水素の放出も促進していることを示唆していると考えられる。6 番目と 7 番目のリテンションが低いのは、それまでの重水素プラズマ照射と TDS の繰り返しにより、ヘリウムバブル層の特性が変化したものであると考えられる。

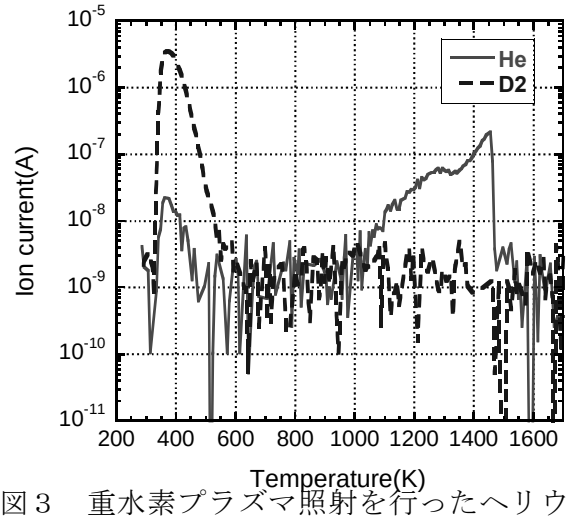



図３　重水素プラズマ照射を行ったヘリウム予照射試料の高分解能 QMS 解析による昇温脱離スペクトル

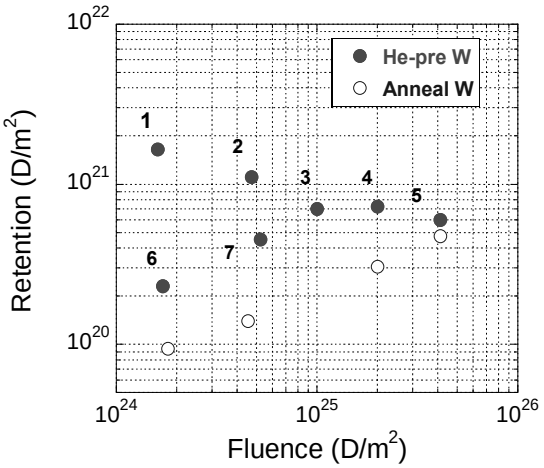



図４　ヘリウム予照射タングステン試料と未照射試料に対する重水素リテンションのフルエンス依存性。図中の数字は重水素プラズマ照射の順番を示している。

３．研究組織

| 氏名 | 所属 | 職名等 | 役割分担 |
|---|---|---|---|
| 坂本 瑞樹 | 筑波大学・数理物質系 | 教授 | 代表者 |
| 大木 健輔 | 筑波大学・プラズマ研究センター | 研究員 | プラズマ計測 |
| 吉川 基輝 | 筑波大学・数理物質科学研究科 | 大学院生（M2） | 表面計測 |
| 野原 涼 | 筑波大学・数理物質科学研究科 | 大学院生（M2） | プラズマ計測 |
| 寺門 明紘 | 筑波大学・数理物質科学研究科 | 大学院生（M1） | 表面計測 |
| 野尻 訓平 | 筑波大学・数理物質科学研究科 | 大学院生（M1） | プラズマ計測 |
| 宮本 光貴 | 島根大学・大学院総合理工学研究科 | 准教授 | 水素吸蔵解析 |
| 時谷 政行 | 核融合科学研究所 | 助教 | 微細組織解析 |
| 渡邉 英雄 | 九州大学・応用力学研究所 | 准教授 | 所内世話人 |
| 吉田 直亮 | 九州大学・応用力学研究所 | 名誉教授 | 微細組織解析 |

## 輸送コードに導入するためのジャイロ運動論解析を用いた熱拡散係数のモデリング

核融合科学研究所　登田慎一郎

磁気核融合装置におけるプラズマ閉じ込めを行うには，乱流輸送は最も重要な課題のひとつである。最近では，トロイダルプラズマにおいて多数のジャイロ運動論シミュレーションが行われている。LHD における ITG モードや帯状流を研究するのにジャイロ運動論方程式を解く GKV-X コードが使われている。LHD での高イオン温度放電 (#88343) のときに，簡約化モデル $\chi_i \sim \rho_{ti}^2 v_{ti} f(\mathcal{L}, \tilde{\tau}_{ZF})/R$ が提唱されている。$\mathcal{L}$ は混合長概算 $\tilde{\gamma}_{\tilde{k}_y}/\tilde{k}_y^2$ を $\tilde{k}_y$ 空間で積分したものである。ここで，$\tilde{\gamma}_{\tilde{k}_y}$ は ITG モードを規格化した線形成長率で，$\tilde{\tau}_{ZF}$ は規格化した帯状流崩壊時間である。しかしながら，TASK3D のような動的な輸送コードで時間ステップごとにジャイロ運動論線形シミュレーションを行うのはコストがかかる。なぜならヘリカルプラズマを対象とする輸送解析は，径電場や磁場配位を正確に評価するために径方向に高解像度が必要だからである。本研究では，低計算コストでの，ジャイロ運動論シミュレーションから導かれた ITG モードの乱流熱拡散係数に関する簡約化モデルの適用方法を示す。簡約化モデルの中の項 $\mathcal{L}$ は，動的な輸送コードでのプラズマ不安定性のパラメーター依存性を含むことが必要である。イオン温度勾配の典型長 $L_{T_i}(= -T_i/(\partial T_i/\partial r))$ が $\mathcal{L}$ を，輸送コードで適用するパラメーターとして選ばれる。磁場配位は輸送シミュレーションの初期状態で固定される。項 $\mathcal{L}$ に対する式を $L_{T_i}$ に関してモデル化した。帯状流の崩壊時間は磁場配位にのみ依存し，プラズマ分布には依存しない。従って，帯状流崩壊時間の式は初期状態でのみ計算する必要がある。項 $\mathcal{L}$ と $\tilde{\tau}_{ZF}$ の式を簡約化モデルに代入した計算は，簡約化モデルの値を許容できる誤差の範囲内で再現できる。輸送シミュレーションでの時間ステップごとで乱流イオン熱拡散係数の値を得るためのコストは，本研究でのモデリングによれば，線形ジャイロ運動論シミュレーションによるものよりも大きく削減できる。本研究で示すモデリングは輸送コードに適用され，シミュレーション結果を LHD における実験結果と比較研究することができる。

初めに，LHD での高イオン温度放電 (#88343) における ITG 不安定性について考察した。まず，乱流イオン熱拡散係数 $\chi_i^{(1)}/\chi_i^{GB}$ の値は関数 $\mathcal{L}\left(\equiv \int(\tilde{\gamma}_{\tilde{k}_y}/\tilde{k}_y^2)d\tilde{k}_y\right)$ だけで，$\chi_i^{(1)}/\chi_i^{GB} = C_0\left(C_T\mathcal{L}\right)^{\delta}$ のように近似されている。ここで $\chi_i^{GB}$ はジャイロボーム因子であり，規格化は $\tilde{\gamma} = \gamma/(v_{ti}/R)$ と $\tilde{k}_y = k_y\rho_{ti}$ である。また $\mathcal{L}$ と $\tilde{\tau}_{ZF}(= \tau_{ZF}/(R/v_{ti}))$ の関数である ITG 乱流熱拡散係数の簡約化モデルは，$\chi_i^{(2)}/\chi_i^{GB} = A_1\mathcal{L}^{\alpha}/(A_2 + \tilde{\tau}_{ZF}/\mathcal{L}^{1/2})$ のように得られている。$C_0$, $C_T$, $A_1$, $A_2$, $\alpha$ と $\delta$ は数値因子である。イオン温度勾配の特性長が ITG 不安定性に重要なパラメーターであると考えられている。$L_{T_i}$ の関数として, パラメーター $\mathcal{L}$ は以下のようにモデル化される。

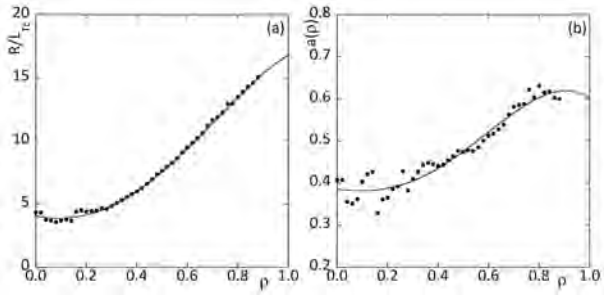


図 1: (a) $R/L_{T_c}$ と (b) $a(\rho)$ の径方向依存性

$$\mathcal{L} = a(\rho)\left(\frac{R}{L_{T_i}} - \frac{R}{L_{T_c}}\right) \tag{1}$$

ここで $L_{T_c}$ は ITG モードが不安定化する規格化したイオン温度勾配である。ITG モードにおける $L_{T_c}$ を調べるために，イオン温度勾配以外のプラズマパラメーターを固定して，$\mathcal{L}$ の $R/L_{T_i}$ に対する依存性を調べた。密度やイオン温度分布については，LHD 高イオン温度放電 (#88343) での時刻 $t = 2.233$s の実験結果を用いた。径方向点で線形関数 (1) を計算し，$R/L_{T_c}$ の値を得た。ITG モードの臨界イオン温度勾配 (a) $R/L_{T_c}$ と $R/L_{T_i}$ に関する傾き (b) は図 1 で得られる。統合輸送コードでイオン熱拡散係数を計算する際，$R/L_{T_c}$ と $a(\rho)$ の補間多項式 $R/L_{T_c} = 4.0929 - 3.7681\rho + 19.712\rho^2 + 11.087\rho^3 - 14.272\rho^4$ と $a(\rho) = 0.38661 - 0.070919\rho + 0.2571\rho^2 + 0.95949\rho^3 - 0.92978\rho^4$ を使用する。

帯状流崩壊時間に対する補間関数は $\tilde{\tau}_{ZF}(fit) = 0.98565 - 0.65943\rho + 2.4471\rho^2 + 3.2337\rho^3 - 2.8382\rho^4$ で与えられ，輸送シミュレーションの際に使われる。項 $a(\rho)(R/L_{T_i} - R/L_{T_c})$ を $\chi_i^{(1)}/\chi_i^{GB}$ の $\mathcal{L}$ に代入した最初のモデル化したイオン熱拡散係数は，

$$\frac{\chi_i^{FTS(1)}}{\chi_i^{GB}} = C_0 \left( C_T a(\rho) \left( \frac{R}{L_{T_i}} - \frac{R}{L_{T_c}} \right) \right)^{\delta} \tag{2}$$

で示される。項 $a(\rho)(R/L_{T_i} - R/L_{T_c})$ を $\chi_i^{(2)}/\chi_i^{GB}$ の $\mathcal{L}$ に代入し，補間関数 $\tilde{\tau}_{ZF}(fit)$ を $\chi_i^{(2)}/\chi_i^{GB}$ の $\tilde{\tau}_{ZF}$ に代入した 2 つめのモデル化したイオン熱拡散係数は

$$\frac{\chi_i^{FTS(2)}}{\chi_i^{GB}} = \frac{A_1 \left( a(\rho) \left( \frac{R}{L_{T_i}} - \frac{R}{L_{T_c}} \right) \right)^{\alpha}}{A_2 + \tilde{\tau}_{ZF}(fit) / \left( a(\rho) \left( \frac{R}{L_{T_i}} - \frac{R}{L_{T_c}} \right) \right)^{1/2}} \tag{3}$$

で与えられる。輸送コードの各時間ステップごとに乱流イオン熱拡散係数の値を得るために，式 (2) と (3) が使われる。

次に TASK3D を使って，モデル化したイオン熱拡散係数を適用し輸送ダイナミクスを考察した。イオン温度分布の初期条件として，LHD 高イオン温度放電 (#88343) において $t = 2.233$s での実験結果を用いた。$T_i$ 分布ダイナミクスを拡散方程式を解析することにより考察した。径方向領域 $0.265 \leq \rho \leq 0.785$ で径電場の 3 つの解が求められる。径電場分布は時間的に固定する。式 (2) と (3) を用いて乱流拡散係数を計算する。まず，正電場を選ぶ。図 2 において，$t = 0.1$s での定常イオン温度分布のシミュレーション結果を示す。図 2(a) では，$\chi_i^{FTS(1)}$ を用いたときのイオン温度分布のシミュレーション結果を示す。$\chi_i^{FTS(2)}$ を用いたときのイオン温度分布を図 2(b) で示す。LHD 放電#88343 における $t = 2.233$s での $T_i$ 分布を破線で示している。図 2 では，$T_i$ 分布の解析結果は，実験結果と矛盾しない。特に，乱流イオン熱拡散係数を $L_{T_i}$ に加えて $\tilde{\tau}_{ZF}$ でモデル化した図 2(b) の場合，実験結果とシミュレーション結果との間でより良い一致が見られる。イオン温度勾配 $L_{T_i}$ による $\mathcal{L}$ のモデリングには，違う $L_{T_i}$ の値について 3 回のプログラム実行が径方向の 1 点について動的な輸送シミュレーションの前に必要である。1 回のプログラム実行について 1 時間かかる。もし $\mathcal{L}$ の値を TASK3D で時間ごとに計算すると，10 万回のプログラム実行が必要である。それ故，ジャイロ運動論解析に基づく簡約化モデルのさらなるモデル化により輸送シミュレーションの低コスト化を行うことができた。次に負電場を選んだ。イオン中心温度は $T_i \simeq 3.2$keV になり，実験結果とは違いが見られる。

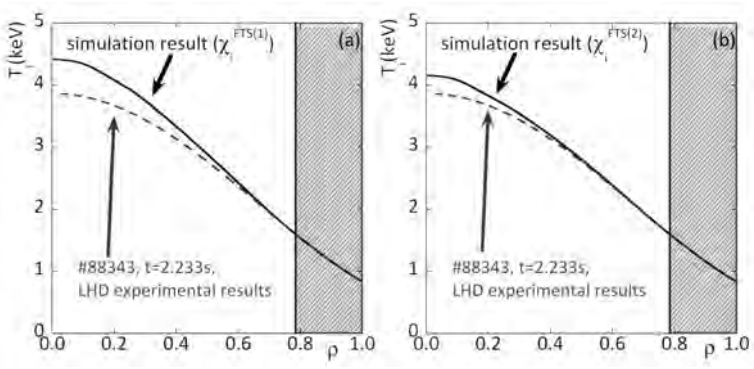


図 2: $T_i$ 分布のシミュレーション結果

計算コストを減らすために，ジャイロ運動論解析の精度を保ったまま，動的輸送コードにジャイロ運動論解析に基づく輸送モデルの適用の仕方を示した。イオン温度勾配の典型長に関する付加的モデリングのために GKV-X コードを実行した。簡約化モデルの帯状流崩壊時間に対する補間式を与えられた磁場配位で求めた。非常に低計算コストで，さらにモデル化した乱流イオン拡散係数により，簡約化モデルの値を再現した。モデル化した乱流イオン拡散係数を動的な輸送コードに適用した場合の計算結果を示した。本研究では，許容できる誤差の範囲内で，ジャイロ運動論輸送モデルを輸送コードに適用する手法を提唱した。ここで示した乱流イオン熱拡散係数の式は LHD 高イオン温度放電 (#88343) で適用できる。

26 FP-12

# 乱流計測シミュレータによる ジャイロ運動論的シミュレーション・データの数値乱流計測

核融合科学研究所 ヘリカル研究部　沼波 政倫

## 研究の目的

高温磁場閉じ込めプラズマ研究において、乱流輸送機構の解明と定量予測は最重要課題の一つである。ジャイロ運動論に基づいた第一原理シミュレーションによる数値解析は、その理解に向けた強力なツールの一つである。一方、シミュレーションに対する Validation 解析は、定量的な輸送評価に向けても必須である。本研究では、これまでに我々が進めてきたジャイロ運動論的乱流シミュレーションによって蓄積された乱流計算データに対して、応用力学研究所で開発が進められている乱流計測シミュレータを適用し、実験計測を数値的に模擬することで、ジャイロ運動論的シミュレーションの Validation 解析手法を確立することを目的としている。特に、乱流揺動分布の詳細な計測に威力を発揮する 2 次元位相コントラスト・イメージング（2D-PCI）[1] による数値計測をこの乱流計測シミュレータで模擬し、シミュレーション内で観測される乱流揺動のスペクトル構造や空間分布を詳細に調べ、実際のプラズマ実験での観測結果と定量的な比較を行うことで、ジャイロ運動論的シミュレーションにおける定量的な乱流構造解析の手法確立を目指す。

## 研究方法

本研究課題で用いる乱流計測シミュレータは、磁場閉じ込めプラズマにおける乱流シミュレーションとその実験計測を模擬した数値診断を行うためのコード群である [2]。この中には、PCI、反射計、重イオンビームプローブ等が含まれており、乱流シミュレーションや計測手法の特性を考慮し、それぞれの組み合わせから、目的に応じた解析を選択し実行することができる。

本課題で対象とする乱流シミュレーション・データは、局所フラックス・チューブ配位の下でのジャイロ運動論的シミュレーション・コード GKV-X[3] で得られたポテンシャル揺動分布データを用いる。従って、実空間上での計測を模擬するにあたっては、いくつかの点においてデータの準備が必要になる。まず、対象となる揺動分布の時系列データを、乱流計測シミュレータに即した時系列データとして整理する。次に、局所フラックス・チューブ配位に対する幾何データを実空間配位に変換する。局所フラックス・チューブ近似の下で得られているシミュレーション・データは、磁気座標を用いた 3 次元平衡コードによって空間幾何配位が計算されている。従って、数値揺動計測にあたっては、実空間上への変換が必要になるため、シミュレーション・データの計測シミュレータに適合したデータへの変換を進める。変換された乱流揺動データに対して、計測シミュレータを用いて、２次元 PCI 計測を模擬し、乱流揺動の波数空間スペクトルや実空間分布を計測する。ここで得られる計測結果とこれまでの乱流シミュレーション解析結果を基に、シミュレーションの Validation 手法の確立を進める。

## 今年度の成果

密度揺動の波数スペクトル計測に使われる PCI は、入射レーザーの密度揺動による散乱を利用して、揺動の波数に関する 2 次元パターンを得る。乱流計測シミュレータにおける PCI 計測モジュールでは、乱流場データから観測位置での密度の値を抽出し、2 次元分布に描き直す。レーザーの入射位置と観測位置を任意に選択することが出来、プラズマを有限な領域幅で切り出した上で、2 点を結ぶ視線方向で積分して 2 次元イメージの密度分布を得る。さらにフーリエ変換する事で、2 次元波数スペクトルを出力する。

この計測シミュレータをジャイロ運動論的シミュレーションから得られたデータに適用するため、今年度はまず、データの精査と局所フラックス・チューブ配位の幾何情報の実空間配位への変換処理を進めた。フラックス・チューブ配位では、ある磁力線の近傍において、磁気座標系 $(r, \theta, \zeta)$ を用いて $(x, y, z) = (r - r_0, (r_0/q_0)(q\theta - \zeta), \theta)$ の field-aligned 座標を用いている。ここで、$r_0$、$q_0$ はそれぞれ、注目する磁気面における小半径と安全係数である。一方、乱流計測シミュレータでは、実空間の直交座標系でシミュレーション・データを取り込むため、双方の座標系変換を行う必要がある。図 1 は、複雑な 3 次元構造をもつ磁場配位において実行した GKV-X によるシミュレーションで得られるポテンシャル揺動分布データを円筒座標系を介して、実空間直交座標系に変換したデータを、数値計測シミュレータに読み込ませた例である。あるポロイダル断面上のポテンシャル揺動分布が出力されており、座標変換とデータの読み込みが問題なく処理されていることが分かる。ここで変換された揺動分布データに対して、上記で述べた PCI 計測のモジュールを適用することで、現実的な PCI 揺動分布計測を模擬することが可能になる。

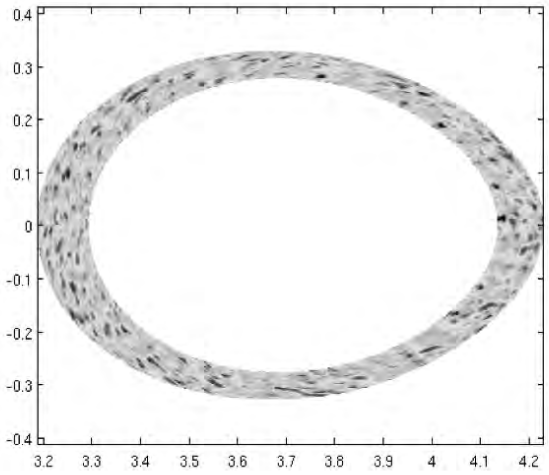



図 1: 乱流計測シミュレータによる GKV-X シミュレーションで得られた 3 次元乱流ポテンシャル揺動分布データのポロイダル断面への変換例。座標系の変換も含めて問題なく動作していることが確認できる。

## まとめ

乱流計測シミュレータは, 実験計測を数値的に模擬するためのシミュレーション・コード群である。これによって、3 次元乱流シミュレーションと実際の実験計測結果を直接比較が可能になる。本課題では、乱流構造の理解に強力な手法の一つとなる PCI 計測の模擬を目指し、計測シミュレータにおける PCI 計測モジュールのジャイロ運動論的乱流シミュレーションでの乱流揺動データへの適用を試みた。今回、計測シミュレータへ適用されたデータを利用し、今後は 2 次元波数スペクトルなど、実際の実験で計測される乱流揺動分布との直接的な比較を行い、乱流シミュレーションの Validation 解析を進めるとともに、より多くの数値乱流シミュレーションのデータを利用し、数値解析の側から実験計測に対する指針提供に繋げていきたいと考えている。

## 参考文献

[1] K. Tanaka, *et, al.*, Rev. Sci. Instrum. **79**, 10E702 (2008).
[2] N. Kasuya, *et al.*, Plasma Sci. Technol. **13**, 326 (2011).
[3] M. Nunami, *et al.*, Plasma Fusion Res. **5**, 016 (2010).

# $SiO_2$ 中におけるヘリウムイオン照射効果

琉球大学教育学部　岩切宏友，狩俣佑妃
九州大学応用力学研究所　渡邊英雄，吉田直亮

**【研究の目的】**

アモルファス $SiO_2$（石英ガラス）は，その汎用性や機能性などから，物理，化学，物質科学，地球科学を始めとする科学技術の諸分野において極めて重要な物質である。また，物質中におけるヘリウムの挙動は，核融合研究や，地殻・マントルや海水などの地球物質の循環を探る上で重要である。特に核融合炉で使用する材料とヘリウムとの相互作用については研究が進んでおり，結晶中における振る舞いについてはよく理解されるようになってきたが，アモルファス材料中におけるヘリウムの挙動については未知の部分が多い。本研究では $SiO_2$ 中のヘリウムの挙動についての計算機シミュレーションを総合的に発展させることを目標とし，その方法論の確立を試みた。本年度は基礎的な金属材料であり，計算機シミュレーションについての多数の先行研究がある鉄中のヘリウムについての第一原理計算および分子動力学計算を行い，よりラージサイズの計算へつなげるための知見を得た。

**【研究方法】**

本研究では純鉄にヘリウムを照射する系についての分子動力学計算を行った。He-He 間および He-Fe 間のポテンシャルについては，Dmol3 を利用して作成した。Dmol3 は密度汎関数理論に基づく第一原理計算ソフトであり，内殻電子まで含んだ計算が可能であることから原子間ポテンシャル作成に最適であると考えられる。なお，Fe-Fe 間は，金属中における自由電子が及ぼす多体効果を含んだ Finnis-Sinclar ポテンシャルを利用した。実験系としては，原子数 432 個の Fe のスーパーセルを構築し，その中にいくつかのヘリウムを配置し，NTP アンサンブル法(粒子数，温度，圧力が一定)を使用してヘリウムの挙動を調べた。

**【研究結果】**

図 1 はスーパーセルの内部にヘリウムを 36 個をランダムに配置した初期構造である。図 1(a)～(d)は初期構造から 300 K で一定温度に保ち、40 ps まで計算したときの構造を示す。分子動力学計算を開始すると，図 1 (b)に示すように鉄中のヘリウムは格子間を拡散していくことにより徐々に集合していき、“格子間ヘリウム集合体”を形成する。時間の経過に伴い格子間ヘリウム集合体は成長していく（ヘリウムを吸収していく）が、ある時点で図 1(c)に示すように複数個の鉄原子をまとめて格子間に放出することで大きな空孔集合体を形成し、そこにヘリウムが捕獲されるようになる。時間の経過に伴い、次々に鉄は押し出され空孔は増加していき、空孔形成が終了したら，すべてのヘリウムはこの空孔集合体に捕獲され安定化する(図 1(d))。この状態は極めて安定なヘリウムクラスターであり、照射下で物質に様々な影響を与えるヘリウムバブルの安定核である。このことは、ヘリウムが結晶中に高濃度に存在するとき，原子空孔を自発的に作り出すことでバブルの安定核が形成されることを示唆している。本研究により，ヘリウム濃度がかなり高い状況下（He/Fe 比が 0.05 程度以上）では，原子空孔がなくともヘリウムバブルを形成し得ることが明らかになった。核融合炉第一壁環境下に入射してくるヘリウムのフラックス成分のほとんどが 100 eV という状況

を考慮すると，本研究で示唆されたバブル形成モデルが核融合炉環境下では主体となる可能性がある。次は，本研究で得られた知見を用い，$SiO_2$ 中のヘリウムの挙動についての研究を進めていく。

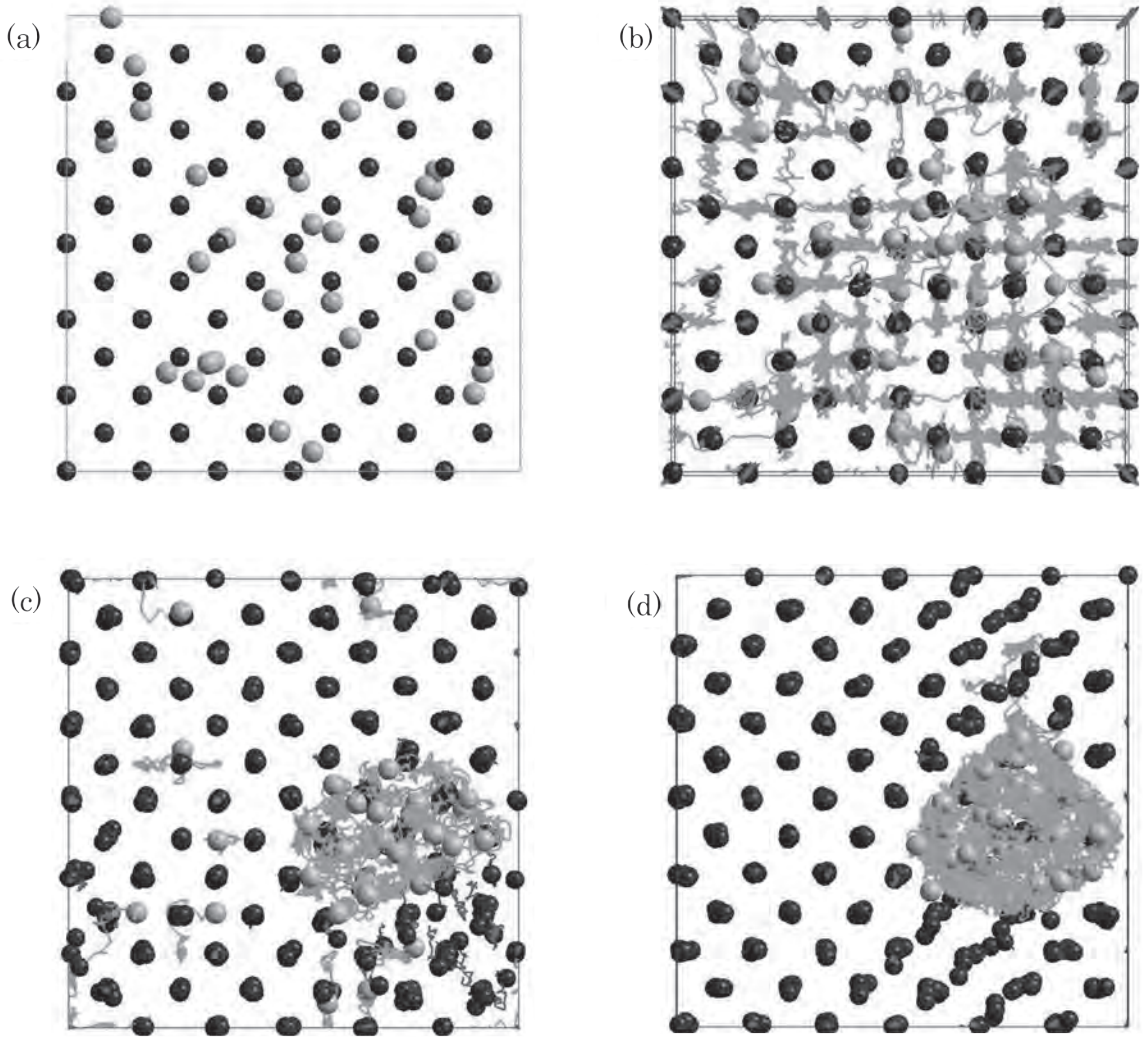



**図1　分子動力学計算により計算された鉄中のヘリウムの凝集の様子。青が鉄原子、濃黄がヘリウム原子であり、緑線および赤線がそれぞれの原子の軌跡を示す。(a) 0 ps （初期配置）、(b) 5 ps 後、(c)　5 ps 後、(d) 40 ps 後**

（成果発表）

- 村吉範彦，「物理教育高度化のための計算機シミュレーション ～固体材料中におけるガス原子の存在状態～」，2015 年　琉球大学大学院教育学研究科，修士論文

# 26 FP-14

タングステンの力学特性に及ぼすヘリウムまたは水素の影響

京都大学原子炉実験所　徐　虬　　佐藤紘一
九州大学応用力学研究所　　徳永和俊

1．目的

核融合炉内には、多量の水素が存在し、更に核融合反応によってヘリウムが発生する。ヘリウムと水素は原子空孔との相互作用が非常に強いので、これらのガス元素は核融合炉の第一壁材料の損傷組織及び力学特性に大きな影響を与える。一般的に、水素またはヘリウムは材料の脆化を引き起こす元素である。タングステンは融点が高い、スパッタ率が低い、水素蓄積が少ない利点があるため、プラズマ対向材料として注目されている。本研究は、水素の代わりに、バックグラウンドが低い重水素を用い、まず材料の力学特性に悪い影響を与える水素とタングステンの相互作用を調べる。

２．実験方法

本研究に使われた試料は、アライドマテリアル製の純度 99.95at%、厚さ 0.2㎜ の板状タングステンであった。転位以外の欠陥を取り除くため、1273K で電解研磨したφ5㎜ の試料に対して 5 時間の焼鈍を行った。これに対して、すべての既存の欠陥を取り除くため、1773K で同様の試料に対して 1 時間の焼鈍を行った。良く焼鈍した試料に京都大学原子炉実験所電子線加速器の電子線照射により原子空孔を導入した。損傷量は $2.9\times10^{-5}$ ～$1.3\times10^{-4}$ dpa であった。また、京都大学大学院工学研究科付属量子理工学教育センターの重イオン加速器の 6MeV 鉄イオンにより転位ループと原子空孔集合体を導入した。照射温度は 573K で、表面から 1μm までの平均損傷量は 1.8dpa であった。既存または導入した欠陥と重水素の相互作用を調べるため、マグネットセパレータ付 He イオン銃（オメガトロン社製）を用いて重水素注入をした。イオン注入装置においては、バリアブルリークバルブで重水素ガスの流量を調整し、イオンガンコントローラーでフィラメントの電流や加速電圧等を調整した。重水素イオンカレントは、ファラデーカップによりを測定した。重水素イオンビームを均一にするために、ファラデーカップは Φ3 mm と Φ6 mm の 2 つを用いた。その後、試料に重水素イオンを注入した。なお、重水素注入前の真空度は $10^{-5}$ Pa オーダーで重水素注入中はおよそ $2\times10^{-4}$ Pa である。重水素注入は室温で、弾き出し損傷ができない加速電圧 1keV で行った。重水素照射量は $1.0\times10^{20}$ $D_2^+/m^2$ であった。注入後、昇温脱離ガス分析法（TDS）により 1523K までヘリウムの放出を調べた。昇温速度は 1K/s であった。

３．実験結果と考察

図１と２に 1273K で 5 時間と 1773K で 1 時間焼鈍したタングステンの内部組織を示した。前者に転位が観察され、後者に欠陥が殆んど観察されなかった。また、後者の陽電子消滅寿命測定は 108.3 ps であったので、透過電子顕微鏡では観察できない欠陥も無かったことが分かった。図３に良く焼鈍されたタングステンに $5.0\times10^{21}$ $D_2^+/m^2$ まで重水素を注入した TDS の結果を示す。タングステン表面にトラップされた重水素の放出温度は 400～600K である。図４に電子線照射により導入した単空孔にトラップされた重水素の放出温度は 550～600K であることを示した。これに対して、図５に示したように転位にトラップされた重水素の放出温度は 600～650K である。高エネルギー鉄イオンにより格子間原子と原子空孔集合体が形成される。格子間原子集合体と重水素との相互作用が転位と重水素との相互作用と同じだと考えられるので、図６に示した重水素の放出が原子空孔集合田によるものであったことが分かる。その放出温度は 800～900K である。

また、TDS の昇温速度を変えることにより、以下の式を用い、欠陥と重水素の解離エネルギー$E_d$を求められる。ここで、$\beta_i$は昇温速度、$T_i$は重水素の放出ピーク温度、$k_B$はボルツマン定数である。単空孔と重水素の解離エネルギーは 1.40eV であった。この値は、文献値と合致するものであった。

$$ln\beta_i + 0.4567\left(\frac{E_d}{k_B T_i}\right) = constant$$

４．まとめ

本研究では、核融合炉のダイバータ部での使用が見込まれるタングステンを対象とし、照射による欠陥と重水素との相互作用に注目した。そして、タングステン中の重水素トラッピングサイトの同定と単原子空孔と重水素の解離エネルギーの算出を目的とした。単空孔、転位と原子空孔集合体によりトラップされた重水素の放出温度は、それぞれ 550～600K、600～650K と 800～900K である。単空孔と重水素の解離エネルギーは 1.40eV であった。

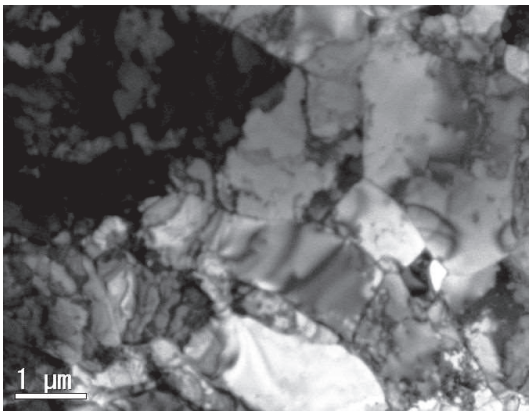



図１　1273K で 5 時間熱処理したタングステンの組織

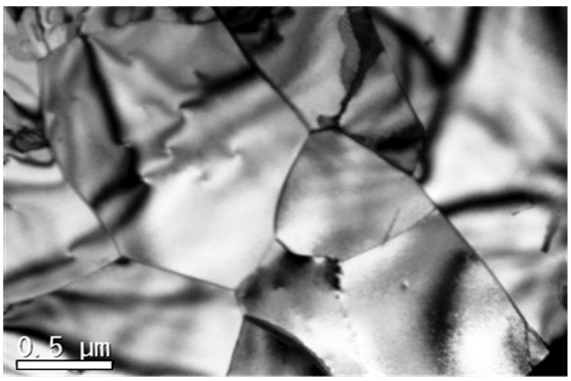



図２　1773K で 1 時間熱処理したタングステンの組織

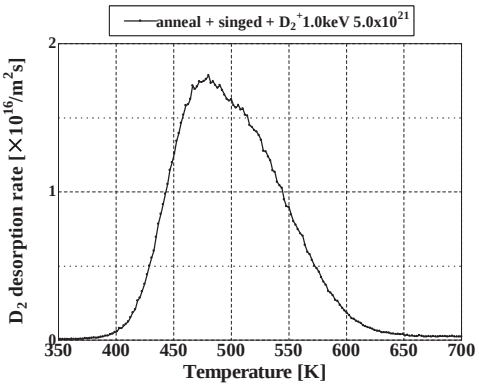



図３　良く焼鈍したタングステンに重水素を注入した試料の TDS 結果

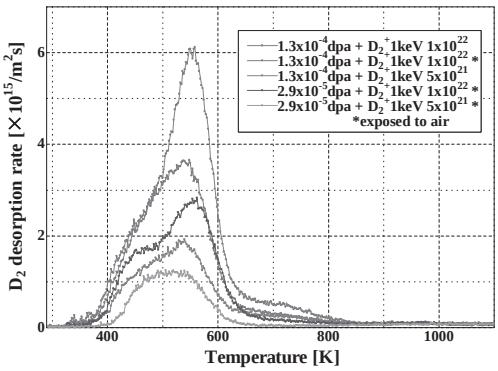



図４　タングステンにおける単空孔にトラップされた重水素の放出

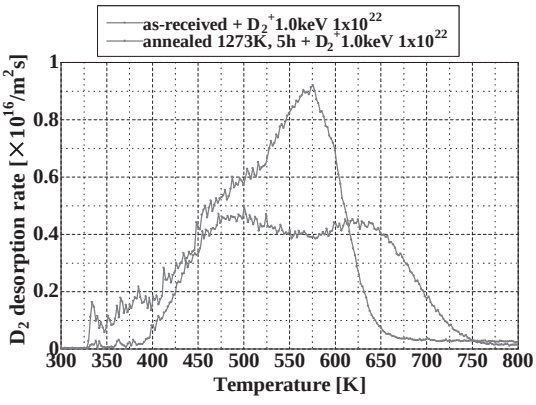



図５　タングステンにおける転位にトラップされた重水素の放出

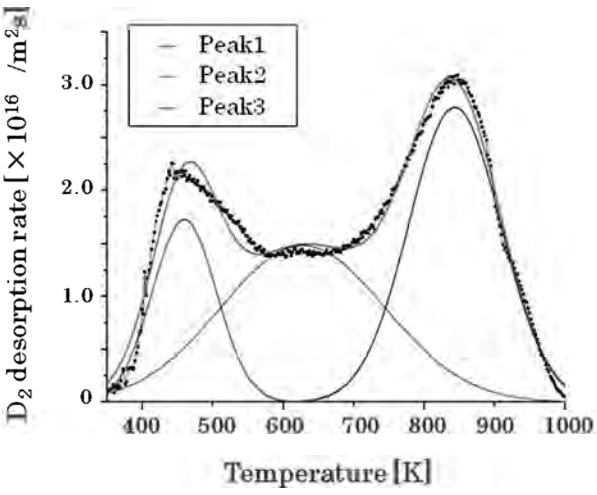



図６　タングステンにおける空孔集合体にトラップされた重水素の放出

# 有限自由度モデルを用いたプラズマ乱流の統計解析

Statistical analysis of plasma turbulence by a few degrees of freedom models

富山大学・人間発達科学部　成行 泰裕

**研究目的：**

プラズマ中に圧力・密度・温度勾配やビーム成分などが存在する時、それらを緩和する過程でドリフト波乱流などが励起される。プラズマが層流状態から乱流状態へ遷移する過程においては、乱流中の不安定モードは少数であると考えられるため、系から少数の不安定モードを抜き出した少数自由度モデルを用いた解析が可能である。ただし、小数自由度モデルにおいても個々のモードの時間発展はカオスになるため、統計的な性質の理解が不可欠である。

本研究では、前年度に引き続き森の射影演算子法から導かれる時間相関スペクトルと記憶関数スペクトルの関係式に着目して、主にアルヴェンカオスを記述する小数自由度モデル[1]の散乱モデルの統計的性質について議論を行う。

**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：**

本年度の研究成果は以下の通りである。いくつかの初期結果については、学会発表を行っている[成果 1]。

(1)アルヴェンカオス系におけるカオス摩擦の評価と周期成分の抽出

アルヴェンカオス系の直接数値計算を行い時系列データから射影演算子法を用いてカオス摩擦の評価を行った。具体的には、(1)記憶関数をマルコフ化して摩擦係数にする、(2)時間相関関数の発展方程式を強制減衰振動の式に変形する、(3)数値計算データの周波数分析(FFT)から得られた外力(印加アルヴェン波)モードのパワーを拘束条件として強制減衰振動子の解から摩擦係数を求める、という手順で評価を行った。この手順ではサイドバンドによる変調は再現することができないが、求まった強制減衰振動子の解の位相は数値計算データの速度相関のものと良く一致することが分かった。また、求めた摩擦係数の大きさは他の係数の値と比べて同オーダーの値をとった。

(2)アルヴェンカオス系における時系列の位相相関

(1)で用いた数値計算データに対して、サロゲートデータ法を用いた位相相関指数の計算[3]を行った。具体的には、フーリエランダムサロゲートを生成し、そのデータ

とオリジナルデータ、位相を人工的に揃えたデータの構造関数をそれぞれ評価したものを用いて、ランダムサロゲートとオリジナルデータの有意差を示す 0 から 1 の値をとる指数の計算を行った。その結果、カオスが生じる場合でも、パラメータによって有意な位相相関がみられる場合と位相相関が弱い場合（ガウス過程に近い場合）とが確認された。ただし、マルコフ化を施した(1)の評価では位相相関指数にあまり関係なく良い一致が見られていることから、有限な位相相関がある時系列に対しても(1)のようなカオス摩擦の定義が使用可能であることが示唆された。

時系列の周波数分析より、外力モードの印加アルヴェン波が親波となった変調不安定性により励起されたサイドバンドが確認された。有限の位相相関もこの変調不安定性(波動間相互作用)により生成されていると考えられるため、物理的意味合いの理解のためには高次統計量と位相相関指数の関係性を明らかにする必要がある。また、時間相関関数を用いた定式化からはウィーナーヒンチンの定理よりフーリエモードの位相の情報が失われているため、(1)の計算や過去の研究[1,4]で行われているような記憶関数(記憶スペクトル)の評価とは別の視点からの時系列の非マルコフ的な性質の評価を検討する必要がある。

引用文献：[1] T. Hada et al, Phys. Fluids B 2(11), 2581 (1990); A. C. –L. Chian et al, J. Geophys. Res., 11, A07S03 (2006). [2]e.g., H. Mori and M. Okamura, Phys. Rev. E, 80, 051124 (2009). [3] T. Hada et al, Space Sci. Rev., 107, 463–466, 2003; F. Sahraoui, PRE, 78, 026402, 2008. [4] R. Ishizaki, S. Kuroki, H. Tominaga, N. Mori, and H. Mori, Prog. Theor. Phys., 109(2), 169 (2003); R. Ishizaki, H. Mori, H. Tominaga, S. Kuroki, and N. Mori, Prog. Theor. Phys., 116(6), 1051 (2006); H. Mori, S. Kuroki, H. Tominaga, R. Ishizaki, and N. Mori, Prog. Theor. Phys., 111(5), 635 (2004).

**公表状況：**

**(学会発表)**

[成果 1]成行泰裕，佐々木真，糟谷直宏，羽田亨，矢木雅敏，Evaluation of chaos-induced friction in Alfven system by using the projection operator method, Plasma Conference 2014, 20PA-043，新潟，2014.11.

**研究組織：**

成行泰裕（富大・人間発達）、佐々木真（九大・応力研）、羽田亨（九大・総理工）

**謝辞：**

有益なコメントを頂いた九大応力研の糟谷先生、岡村先生、原研の矢木先生に謝意を表します。

26 FP-16

# プラズマ物理におけるマルチスケール・マルチフィジックスシミュレーション研究

日本原子力研究開発機構　矢木雅敏

## 目的

プラズマ物理においては、時間尺度および空間尺度が異なる諸現象（MHD、微視的乱流等）が異なる空間領域にわたって相互作用し、その結果としてプラズマ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、外部加熱をともなう輸送、MHD、乱流の非線形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、ディスラプション、直線装置における乱流現象等､プラズマ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おこない、マルチスケール・マルチフジックスシミュレーション研究を推進する。

## 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。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、その物理機構の解明が求められている。これまでの先行研究では、分布の速い応答は説明できるものの､分布の大局的な変化を説明するには至っていない｡本研究では簡約化 MHD モデルを用いて定常乱流状態を作り出し、過渡的な加熱ソースを印可し、プラズマの過渡応答を調べている。炉心部の閉じ込めにはイオン温度勾配(ITG)に起因する乱流が重要な役割を果たしていると考えられている。非局所応答が発見された簡約化 MHD シミュレーション[1,2]には炉心部の ITG 乱流の効果は含まれていない。今回、大域的 ITG 乱流コードに、粒子入射の効果をイオン温度に対するシンク（冷却、コールドパルス）として実装する拡張を施し、簡約化 MHD シミュレーションと同様なシミュレーションを行った。この ITG 乱流シミュレーションでは簡約化 MHD シミュレーションで見られたような非局所輸送は観測されなかった。図 1 は 400≦t≦450 の間、$r/a = 0.8$付近にコールドパルスを与えたときの温度揺動のcosθ成分の時空間変化を示している。この成分は簡約化 MHD シミュレーションで見つかった非局所輸送において重要な役割を果たしているが、ITG 乱流により散逸され、非局所輸送に必要な半径方向に伸びた構造を保てなくなることがわかる（図 1 左)。一方、図 1 右は t=400 から乱流との非線形結合を人工的に切った場合であるが、半径方向に伸びた構造を保っている。このように ITG 乱流は非局所輸送を妨げる傾向にあることが明らかになった[3]。

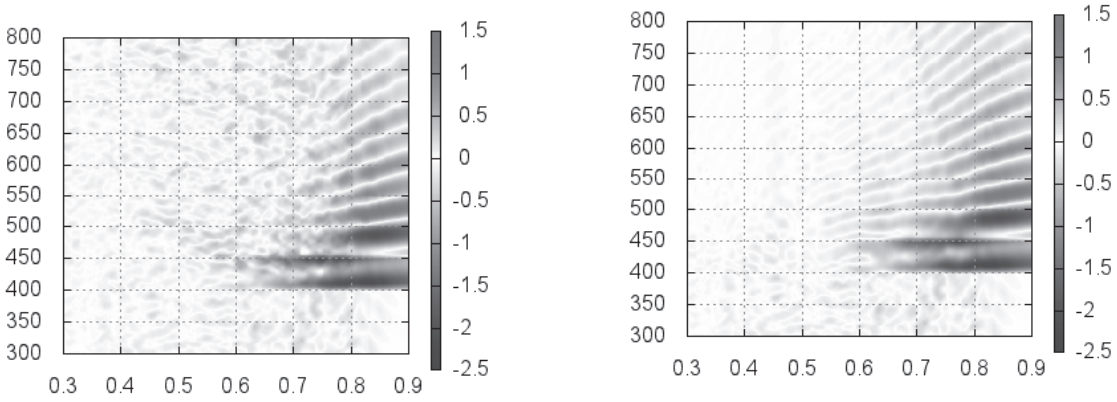



図１：温度揺動のcosθ成分の時空間発展を示す。非線形効果あり(左図)、非線形効果なし(右図)。

**考察**

今年度の研究により、非局所輸送がモデルやソース、シンクに依存していることが明らかとなった。H25 年度に報告したシミュレーションでは、ソースモデルとして $S = S_{AMP}\exp(-\xi^2/2\Delta^2),\ \xi^2 = r^2 + r_s^2 - 2rr_s\cos\theta\cos\theta_s - 2rr_s\sin\theta\sin\theta_s$ を用いたが、$\theta_s = 0$ のみの場所に着目した。一方、今回の研究で明らかになった点は、$\sin\theta$ 成分はいわゆるGAM(Geodesic Acoustic Mode)振動と関連するものであり、ソースによるその影響を考慮するためには $\theta_s \neq 0$ にする必要があること。また ITG モデルでは温度の発展方程式に対し、シンクを導入したが H25 年度の研究ではソースを考えている。ペレット入射実験では密度と電子温度が関係しており密度のソースと電子温度のシンクを同時に考える必要があること。また今回考えた ITG 乱流もあわせて考慮する必要があることなのである。今後の課題として、これらの問題点を考慮したモデルの拡張、コード開発を進め、非局所輸送のシミュレーション研究につなげることがあげられる。

**参考文献**

[1] 矢木雅敏、平成 25 年度共同利用報告書 25FP-1

[2] Yagi, M., Matsuyama, A., Miyato, N., et al., "Simulation study of nonlocal transport from edge to core in tokamak plasmas," Contribution to Plasma Physics, 54, 363 (2014).

[3] Miyato, N., "Effect of Ion Temperature Gradient Driven Turbulence on the Edge-Core Connection for Transient Edge Temperature Sink," Plasma and Fusion Research, 9, 1203148 (2014).

**研究組織**

**矢木雅敏(原子力機構)、宮戸直亮(原子力機構)、松山顕之(原子力機構)、糟谷直宏(九大応力研)、佐々木真(九大応力研)**

# 26 FP-17

## 高温構造材料の重イオン照射による組織変化初期過程と中性子照射との相関

核融合科学研究所　室賀健夫

１．目的

各種原子力プラントにおいて照射下で使用される高温構造材の使用下限温度を決めるのは、多くの場合照射による硬化とそれに伴う脆化である。低温領域では照射による析出は起こりにくく、転位ループの形成、成長による硬化が支配的であることが知られている。転位ループの形成、成長については、純金属やモデル合金に関し多くの研究があるが、先進耐照射性材料として期待される V-4Cr-4Ti 合金における研究例は少なく、中性子照射との相関研究は極めて限られている。原子炉による中性子照射の機会が限られている現状では、重イオン照射の役割が特に大きい。本研究では、上記合金の照射脆化が顕著な温度領域において制御された重イオン照射を行い、微細組織、特に転位ループの形成・成長過程を明らかにし、中性子照射と比較することにより、重イオン照射による使用下限温度の予測の精度を高めることを目的とした。

２．方法

核融合科学研究所で製作した、V-4Cr-4Ti 合金共通試料 NIFS-HEAT-2 を対象とした。応用力学研究所の重イオン加速器を用い、照射脆化の激しい 400-600K で 0.1-1 dpa の照射を行い、照射後の組織観察を応用力学研究所および核融合科学研究所の透過電子顕微鏡とエネルギー分散型Ｘ線分光器を用い、転位ループの密度、サイズの変化を求めた。また Ti が転位に局所濃縮、欠乏していないかを確かめ、転位誘起の Ti-CON 析出の可能性を調べた。さらに JMTR 中性子照射組織と比較し、重イオン - 中性子照射相関を求めた。

３．結果と考察

Table 1 に照射条件を示す。Fig. 1 に、イオン照射の組織変化を示す。観察された組織はほとんど転位ループあるいはドットイメージであった。微小な欠陥の観察のため、暗視野弱ビーム法による観察を併用した。

Fig. 2 に転位ループ、ドット密度の照射温度依存性を示す。比較のため、電子線照射による V-20Ti, V-3Ti-1Si のデータも示す。[1] 温度依存性が 500K 以下でほとんど無く、500K 以上で顕著に現れる点、全体に同じ傾向が見られる。中性子照射材の密度が他と比べてやや低いが、これは損傷速度の違いを考慮すると定性的に説明できる。573K イオン照射材においてループへの Ti 偏析は確認できなかった。

今後は、転位ループへの Ti の偏析のイオン・中性子照射の差、より高温における照射誘起析出の発生過程を明らかにする予定である。

参考文献

[1] T. Muroga, H. Watanabe, N. Yoshida, ASTM STP 1047 (1990) 199-209

４．研究組織

室賀健夫、菱沼良光、宮澤健（核融合科学研究所）、渡辺英雄（九州大学応用力学研究所）

５．発表論文

(1)T. Muroga, J.M. Chen, V.M. Chernov, R.J. Kurtz, M. Le Flem, " Present status of vanadium alloys for fusion applications ", J. Nuclear Materials, 455, 2014, 263-268

(2) T. Miyazawa, T. Nagasaka, R. Kasada, Y. Hishinuma, T. Muroga, H. Watanabe, T. Yamamoto, S. Nogami, M. Hatakeyama, “ Evaluation of irradiation hardening of ion-irradiated V–4Cr–4Ti and V–4Cr–4Ti–0.15Y alloys by nanoindentation techniques” J. Nuclear Materials, 455, 2014, 440-444

６．国際会議での発表

T. Muroga, T. Miyazawa, T. Nagasaka, H. Watanabe, “Dislocation Loop Evolution in V-4Cr-4Ti by Heavy Ion and Neutron Irradiation at Relatively Low Temperature”, JCS-12 (Sept. 2014, Shizuoka)

Table 1. 照射条件

| Irradiation | Temperature | dpa | dpa/s |
|---|---|---|---|
| 2.4MeV $Cu^{2+}$ ions | 403-413K | 1.0 (peak) | $4.5 \times 10^{-3}$ |
| | 473K | 1.0 (peak) | $4.5 \times 10^{-3}$ |
| | 573K | 1.0 (peak) | $4.5 \times 10^{-3}$ |
| Fission Neutrons (BR2) | 363K | 0.20 | $1.10 \times 10^{-7}$ |
| | 563K | 0.20 | $1.10 \times 10^{-7}$ |
| Fission Neutrons (JMTR) | 563K | 0.08 | $4.4 \times 10^{-8}$ |

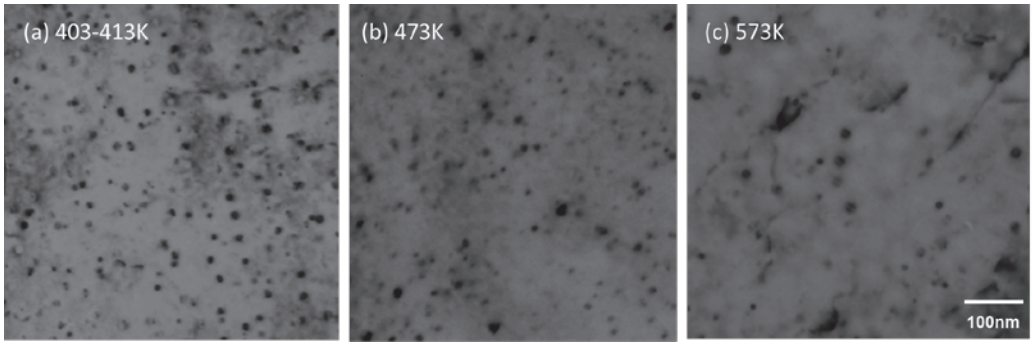



Fig. 1　V-4Cr-4Ti 合金のイオン照射による組織変化

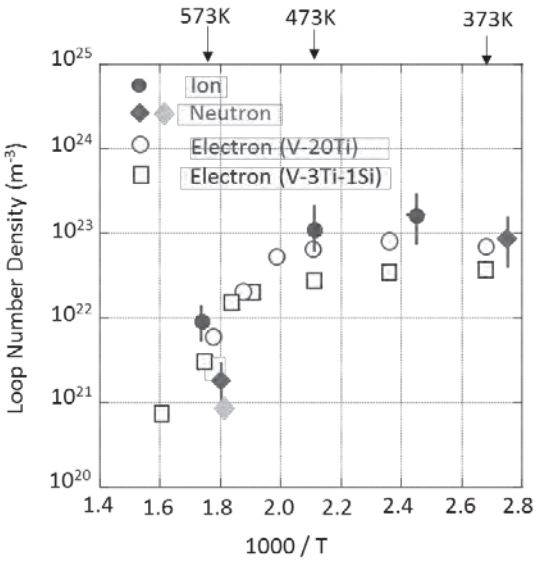



Fig. 2　V-4Cr-4Ti 合金の転位ループ密度の照射温度依存性。
V-20Ti 合金, V-3Ti-1Si 合金の電子線照射[1]と比較して示す。

# 26 FP-18

PdCu 透過薄膜を用いた水素原子束プローブの開発

京都大学・高木郁二

**課題番号：**26FP-18
**研究課題：**PdCu 透過薄膜を用いた水素原子束プローブの開発
**研究期間：**H26 年 4 月 1 日－H27 年 3 月 31 日
**所内世話人：**図子秀樹
**協力者：3** 名（大中雅侑、図子秀樹，A. Kuzmin）
**配分額：**研究費（6 万円），旅費（9.3 万円）

**目的：**

真空中での水素分子モニターは各種の電離真空計が多数存在するが、水素原子モニター機器は実用に耐える形では十分には確立していない。水素分子が金属中に溶解するためには表面で原子に解離しなければならないこと、原子への解離確率は特殊な場合を除いては極めて小さいこと、水素原子は金属中に容易に溶解し、拡散・透過することから、金属膜をプラズマに曝すと、プラズマから飛来した水素原子はよく透過するが、周辺から飛来する水素分子はほとんど透過しないというプラズマ誘起透過現象が起こる。透過量を四重極ガス分析器などで測定すると、水素分子が多数存在する条件であっても、水素原子を選択的に検出することができる。このシステムを水素原子プローブと呼ぶ。

本研究では水素原子束を定量的にリアルタイムで測定し、しかも耐久性のあるプローブを開発し、水素原子束測定方法の確立をめざす。これにより、１）プラズマ実験において正確な壁入射フルエンスの実測、２）局所壁吸蔵率と global 吸蔵率との関係を明らかにすることを目的としている。昨年度まではプローブシステムを設計、製作し、QUEST 内の複数の位置に設置し、透過量を観測してきた。今年度は、プローブの定量性（感度、検出限界）、時間応答性および耐久性を評価することが目的である。

**水素プローブとその耐久性：**

代表者らは、平成 21 年から 23 年にかけて QUEST に直径 16mmφ の透過プローブ(Ni,SUS,Pd 薄膜)を設置し、水素透過の実測を行ってきた。これにより、数１０００ショットに及ぶ回数でもプローブが安定して動作すること、同一プラズマ条件での透過量の再現性が極めて優れていること、プローブは水素原子に対して感度が高いこと、約 3 桁の範囲にわたって透過量が測定できることなどを確認した。しかしリアルタイムで水素原子束の時間変化を観察するには性能が不十分であった。そこで、水素の拡散が速く、薄くても破損しないような優れた機械的強度を有し、水素化物を生成しない金属膜として PdCu を選択し、平成 24 年度に厚さが 22μm で、真空に耐えうるように両面を透過率 50%、厚さ 1 ミリのステンレスで支持する構造の原子束計測プローブ（長さ約 80mm,直径 30mm)を開発した。同年、このプローブを QUEST 内の下側ダイバーター部に設置し、水素原子プローブとしての基本性能を 100-400℃の温度範囲で満たすことを確認した。平成 25 年度はこのプローブを 2 個製作し、図 1 に示すように上下の平板ダイバーター（PDP4)、外側水平壁部（PDP6）に設置し、多点位置での局所吸蔵率の推定を行った。プローブへの入射束はこのプローブに垂直方向のみに限定しているので、いずれも磁力線を横切るイオン束、ならびに中性粒子束を検出している。

QUEST で 38 日間、892 回のショットに曝した後で水素分子による透過実験で評価したところ、透過量は最大でも 5%しか減少していなかった。また、QUEST に設置したプローブは 2 年間、8095 回のショットに曝しても稼働していた。これらのことから、PdCu 膜のプローブは十分な耐久性を有していると言える。

**定量評価：**

PdCu 膜の定量評価のための実験は、京都大学にある小型プラズマ実験装置を用いた。この装置は 20W 程度の RF 発振器と放電管、水素透過系で構成しており、イオン加速器からイオンをその場で透過試料に照射できるようになっている。試料は厚さ 0.02mm の PdCu 膜であり、この片面を重水素の RF プラズマに曝して、他方に透過する重水素量の時間変化を測定した。また、試料をプラズマに曝した状態のまま $^3$He イオンを照射し、核反応法を用いて試料表面近傍の重水素濃度を測定した。

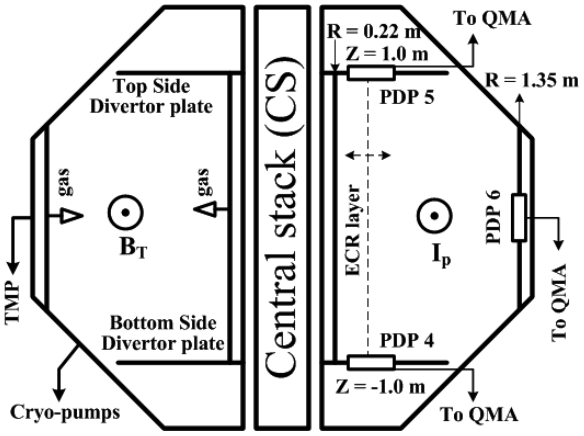



図１　Set up of PDP4-6 probes

先ずプラズマ側と透過側の再結合定数$K_u$、$K_d$ を求めた。通常の透過実験では$K_u$と$K_d$はアレニウス型の温度依存性を示すと仮定するが、本実験では濃度を直接測定しているために値を一義的に決定することができる。その結果、図２に示すように。$K_d$ は高温部と低温部で温度依存性が異なることが分かった。これらの値を用いて透過束の時間変化を計算したところ、図３に示すように実験値とよく一致し、値の妥当性を確認することができた。透過束を$J$、入射水素原子束を$F$ とすると、定常状態における収支は

$$F = (K_u + K_d)J/K_d \qquad (1)$$

と表される。図２によると480K以下では$K_u$=$K_d$ とみなせるため、定常状態では$F$= 2$J$ という極めて単純な関係で水素原子束を評価できることが分かった。

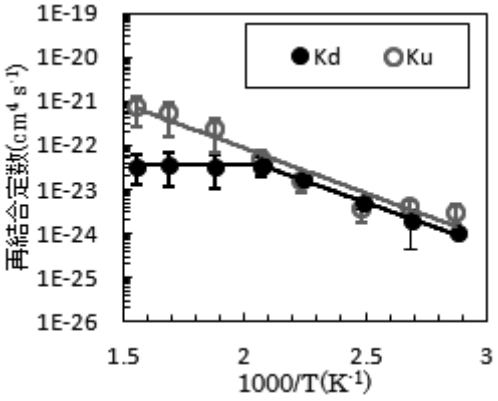



図２　再結合定数の温度依存性

時間応答性については、プラズマと試料との間に設置した機械的なシャッターを開閉し、透過束を測定した。その結果、シャッターを動作してから0.9s 以内に透過束が変化した。実際の応答はこれよりも早いと考えられるので、より速い計測が可能な機器を用いて今後追試を行う。また、拡散係数と再結合定数から時間応答を数値解析によって評価することもできるため、拡散係数の測定も行う。

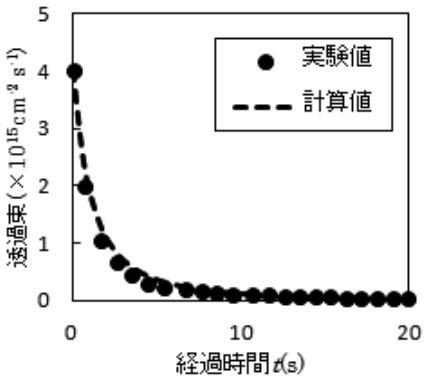



図３　483K における透過束の時間変化

入射束の検出限界は、評価に用いた小型プラズマ実験装置では4.6×10$^{11}$ atoms cm$^{-2}$ s$^{-1}$であった。検出限界はガス分析計のバックグランドのゆらぎに最も強い影響を受けるため、安定したガス分析計を用いれば更に高感度のシステムを構築できることが分かった。

以上の成果は2015年原子力学会春の年会にて発表した。

26 FP-19

# QUEST スクレイプオフ層における 原子密度・速度局所計測のための近赤外干渉分光器の開発

京都大学大学院工学研究科　四竈 泰一

## 研究目的

トカマクプラズマ境界の開いた磁場構造を持つスクレイプオフ層（Scrape-off-layer: SOL）におけるイオン流れは，プラズマの境界条件を決める重要な因子であると考えられており，流れの駆動メカニズムの理解と制御に向けた研究が進められている．流れの駆動力の一つは，磁力線に沿ったイオン圧力勾配であり，また，流れはイオンと原子の荷電交換反応による運動量損失で散逸する．これらの過程は，電離束及び荷電交換の反応レートを通して原子の密度，速度の空間分布に影響を受けることから，イオン流れの生成，散逸メカニズムを理解するためには，原子の密度及び速度の空間分布を計測することが必要だと考えられる．

原子は電荷を持たないため，プラズマ中でその密度，速度を測定するためには，発光線形状の測定（発光強度，ドップラーシフト）がほぼ唯一の方法である．この際，単純な受動分光法では，測定値は視線上に存在する発光の線積分値となる．空間分解した発光の情報を得るためには，レーザ誘起蛍光のような能動的な分光法，あるいは複数の視線を利用したトモグラフィー法を用いる必要がある．しかし，レーザを用いる場合は入射経路や観測視線配置の制限により空間分布を得ることが簡単ではなく，トモグラフィー法では波長シフトの情報を空間分解することが困難である．そこで申請者は，磁場中の発光線のゼーマン分裂を利用することで，受動分光法単独で原子発光線の局所計測が可能となる新たな手法の開発に取り組んできた．

原子発光線は SOL 近傍に局在している．さらにトカマク内では磁場強度の勾配が存在する．これらの性質を利用することで，発光位置に応じたゼーマン分裂の違いから局所発光線を分離することが可能となる．これまでに，この手法を水素，ヘリウム原子からの可視発光線に適用し，原子の局所計測が可能であることを実証した．本研究では，更に進んで上記計測手法を原子の近赤外発光線へと拡張し，計測精度を向上させることで，放電条件に応じた原子の密度，速度の空間分布を明らかにすることを目的とする．本年度は，ヘリウム原子 $2^3S$-$2^3P$ 発光線（波長 1083 nm）を高波長分解能で測定することが可能な近赤外干渉分光器を開発し，QUEST での初期データ取得を試みた．

## 研究方法・結果

開発した近赤外干渉分光器の模式図を図 1 に示す．捕集した発光を光ファイバで分光器内に導入し，対物レンズ（ミツトヨ M Plan Apo NIR 10×）により直径約 8 mm の平行光線に変換する．この際，シアリング干渉計（シグマ光機 SPV-05）を利用し，光線の広がり角が 0.1 度以下であることを確認した．その後，虹彩絞り（シグマ光機 IH-30）により光線の直径を 1 mm 程度に減少させ，ファブリ-ペローエタロン（LightMachinery OP-1986-64, 波長 1083 nm）に入射する．エタロンは実効フィネスが約 30，FSR が約 0.6 nm であり，ピエゾ素子によってギャップ長を掃引することで透過波長を変化させることができる．掃引速度は最大で 1 FSR あたり 10 kHz であり，本報告内の測定時には 20 $V_{pp}$，10 Hz の三角波電圧を印加し，約 2 FSR の波長領域を掃引した．エタロンを透過した光は，干渉フィルタ（Omega Optical XB173-1080BP10, 中心波長 1080 nm, FWHM 20 nm）を通り，冷却光電子増倍管（浜松ホトニクス R5509-43）で検出される．全ての光学部品はアルミ製の筐体内に設置しており，標準的な空調環境下で約 1 日の間，測定値の再現性を確認している．

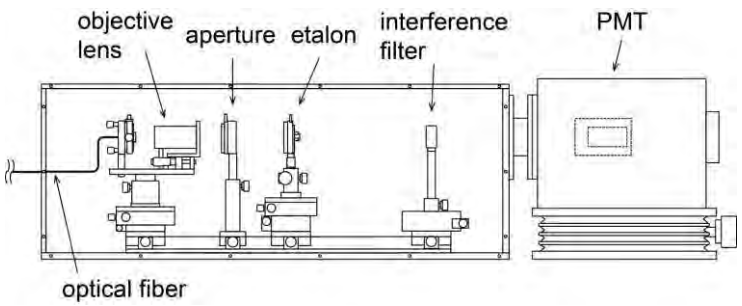



図 1. 近赤外干渉分光器の模式図

エタロンの掃引電圧と透過波長との関係を校正するために，グロー放電プラズマからのヘリウム原

子発光線を観測した．測定結果を図 2 に示す．$2^3$S-$2^3$P 発光線は表 1 に示す 3 本の微細構造を持ち，これらが 2 つのピークとして観測されている．掃引電圧-透過波長間の線形性を仮定し，ドップラーシフトを無視し，ふく射再吸収を考慮した 2 つのピーク波長の計算値から，透過波長($\lambda$)と掃引電圧($V$)の関係を $d\lambda/dV$ = 73.0 pm/V と見積もった．図 2 上の横軸に電圧，下の横軸に波長を示す．

次に，分光器の装置関数を評価するために，装置関数と比較して線幅が十分に小さい単一縦モードレーザダイオード (Thorlabs L1060P200J; 波長 1060 nm) の光を測定した．発光線をローレンツ関数でフィッティングした際の半値全幅は約 235 mV となった．$d\lambda/dV$ は波長に依存するが，エタロンのギャップ長 $l$ に対して $d\lambda/dV \simeq \lambda/l$ と近似すると，1060 nm では $d\lambda/dV$ = 71.4 pm/V，装置関数は 16.8 pm となる．さらに，装置関数が波長の 2 乗に比例すると近似すると，1083 nm における装置関数は 17.5 pm と見積もられた．

開発した分光器を QUEST に適用した．トロイダル磁場のみを印加した状態で，8.2 GHz ECH によりセンタースタック近傍に局在した円筒状のプラズマを生成し，中央平面上の径方向視線を用いて磁場に垂直な方向から発光を計測した（図 3）．発光線形状から，ドップラー広がり，シフトを評価可能であることを確認した．

表 1. ヘリウム原子 $2^3$S-$2^3$P 発光線の微細構造

| 遷移 | 波長 (nm) | A 係数 ($\times 10^7$ s$^{-1}$) |
|---|---|---|
| $2^3S_1$-$2^3P_0$ | 1082.909 | 1.0216 |
| $2^3S_1$-$2^3P_1$ | 1083.025 | 1.0216 |
| $2^3S_1$-$2^3P_2$ | 1083.034 | 1.0216 |

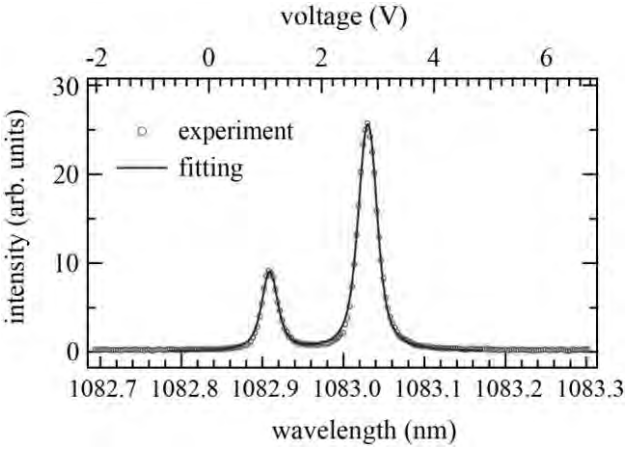



図 2. ヘリウム原子発光線（グロー放電）

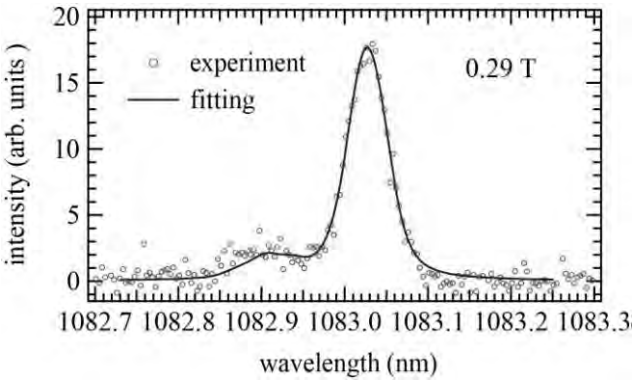



図 3. ヘリウム原子発光線（QUEST）

## 成果報告


[1] T. Shikama, S. Ogane, H. Ishii, Y. Iida, and M. Hasuo, "Measurements of helium $2^3$S metastable atom density in low-pressure glow discharge plasmas by self-absorption spectroscopy of HeI $2^3$S–$2^3$P transition", *Jpn. J. Appl. Phys.* **53**, 086101 (2014).

[2] S. Ogane, T. Shikama, H. Zushi, and M. Hasuo, "Development of a near-infrared interference spectrometer for measurements of the local helium atomic emission lines in the spherical tokamak QUEST", *7th Japan-Korea Seminar on Advanced Diagnostics for Steady-State Fusion Plasmas*, P1-17, 2014.8.17-20, Kyoto, Japan.

[3] 大金 修平，四竈 泰一，図子 秀樹，蓮尾 昌裕,「球状トカマクQUESTにおけるヘリウム原子発光線局所計測のための近赤外干渉分光器の開発」*Plasma Conference 2014*, 19PB-085, 2014.11.18-21, 新潟.

[4] 四竈 泰一，大金 修平，飯田 洋平，蓮尾 昌裕,「ふく射再吸収によるヘリウム原子 $2^3$S-$2^3$P発光線形状の変化を利用した磁場中のヘリウム$2^3$S準安定原子密度計測」日本物理学会 第70回年次大会, 21pBH-1, 2015.3.21-24, 東京 (予定).

[5] 大金 修平，四竈 泰一，図子 秀樹，蓮尾 昌裕，「球状トカマク QUEST における近赤外干渉分光器を用いたヘリウム原子発光線の局所計測」日本物理学会 第 70 回年次大会, 21pBH-4, 2015.3.21-24, 東京 (予定).

# 26 FP-20

## 高温プラズマ曝露炉内機器の表面変質と損傷に関する総合的研究

九州大学　吉田直亮

本研究グループでは、高温プラズマ閉じ込め装置 QUEST および LHD におけるプラズマ・壁相互作用（PWI）の実態を明らかにするために多くのプローブ試料やテスト機器を炉内に設置し、高温プラズマがプラズマ対向材料に及ぼす照射効果について調べてきた。いずれの装置においても、近年プラズマの性能が上がるにつれて PWI によってプラズマの閉じ込め性能が左右される事象が多く見られるようになり、この分野の研究が一段と重要になってきた。

本年度は QUEST や LHD でプラズマ曝露された各種試料について応用力学研究所に設置されている走査型電子顕微鏡（JSM-5900）、透過電子顕微鏡（JEM-2000EX）を用いて表面組織や内部組織を詳細に調べると共に、低エネルギーガスイオン注入装置や昇温脱離装置を用いて水素同位体の吸蔵・放出特性（特に各装置の壁面温度近傍での最大吸蔵量や放出の時定数など）を調べた。また、断面組織の観察には収束イオンビーム加工観察装置（FB-2100）を用い試料を加工した。研究成果の一部は末尾に記した学会で報告したが、本稿では QUEST におけるプラズマ対向壁の表面変質の実態とそこに至った原因とプロセスについての研究に絞って報告する。

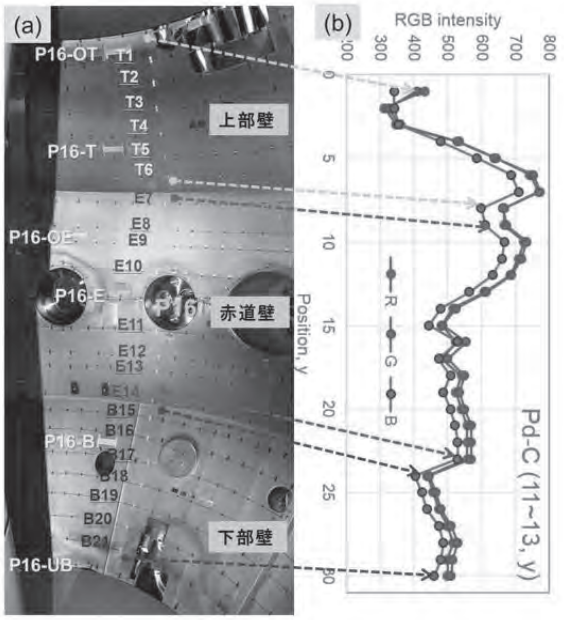



図 1 (a)　2014SS 実験終了後の炉内の状況
(b) T1 から B24 近傍の RGB 値

図 1 (a)は 2014 年春・夏キャンペーン（2014SS）終了後の QUEST 内部を示す写真であり、壁面の色が場所によって大きく異なることが注目される。トロイダル方向（水平方向）はほぼ同じような色合いになっているが、ポロイダル方向（垂直方向）では複雑に変化しているのが特徴である。写真中に記した T1～B21 に沿って測った壁面の RGB 値（ポータブル型カラーアナライザーで測定、1024 諧調表示）を図 1 (b)に示す。最上部は最も強く変色しているが、下がるにつれて RGB 値は急激に増加し、上部壁の中段から赤道部壁中心（赤道線）にかけての広い領域で変色は僅かで本来の壁（ステンレス鋼）に近い色を保っている。これとは対照的に、赤道線より下側ではポロイダル方向の変化も弱く薄い茶褐色となっている。図 2 は図 1 (a)に記した 5 か所（T1, T2, T3, T4、B15）から採取した壁面サンプルの断面組織写真である。実測した堆積層の厚さを写真中に記した。着色が激しいほど（RGB 値が低いほど）堆積層は厚くなっており、厚い T1、T2 では各放電キャンペーンに対応する明瞭な層状構造を持っている。図 3 は T1 の断面組織写真とそれに対応する GD-OES

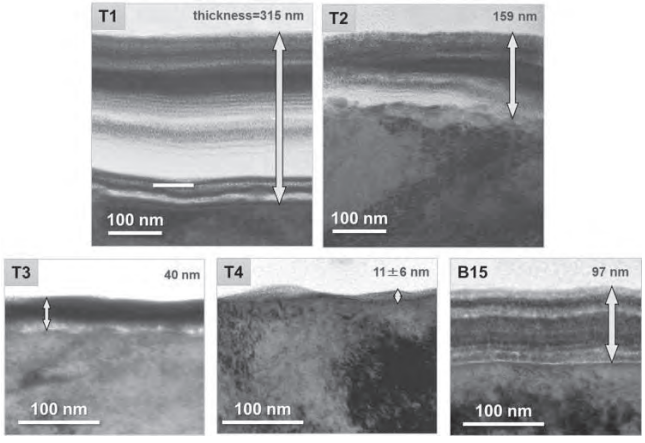



図 2　壁面より剥がしたサンプルの断面組織を示す透過電子顕微鏡写真

分析データを比較したものである。例えば、中央部の白い部分では金属元素は少なくCが主となっている。個々の実験キャンペーンで堆積した不純物の組成と比較することにより、この白色の領域はCの発生が異常に多かった2012SS、2012AWで形成されたものであることが判った。その上に積もった黒い層は内部機器（ステンレス鋼製）の一部が放電中に溶融したことによって放出されたFe, Crなどを通常より多く含む2013SS、2013AWの堆積層である。他の層についてもそれらが形成されたキャンペーンを図中に記した。一方、上部壁中央部から採取したT4の表面は10nm程度の薄い不純物層で覆われている。この近傍で2014SSのみのプラズマに曝した試料への堆積層の厚さも同程度であることからこの領域では付着した不純物原子はいずれ再放出されるいわゆる損耗ドミナントな現象が起こっていることが判る。

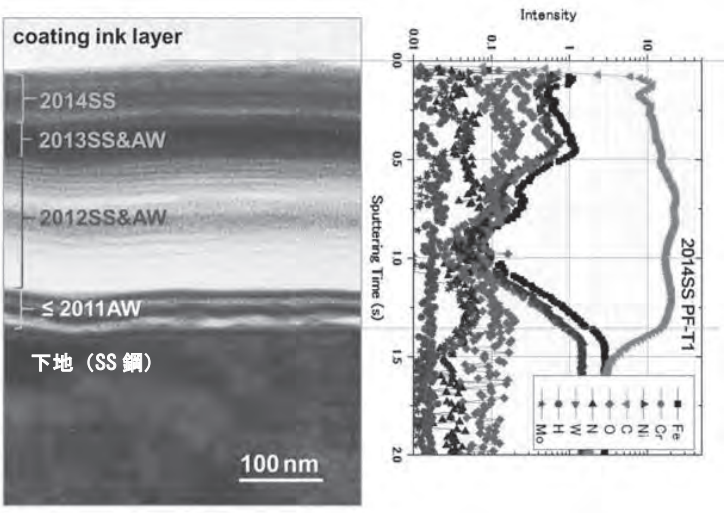



図３　T1 の断面組織とそれに対応する構成原子の深瀬分布（GD-OES 分析）

堆積層の厚さと RGB 値には図４に示すような相関がある。この換算曲線を用いると評価に手数がかかる堆積層の厚さを簡便な RGB 測定から容易に評価することが可能となる。ただし、この手法の適用に当たっては堆積層に組成や構造が似通って物質であることが前提となる。両者の相関を理論付ける詳細な研究は別途行われている。

図５は2014SSにおいて炉内の６ヶ所（P26-OT, P26-T, P26-OE, P26-E, P26-B, P26-UB）に置かれ試料ホルダーの写真である。図６は左右に隣り合う２枚の薄板試料（圧さ 0.1mm）と上下の２枚の固定板（厚さ 0.1mm）で囲まれ周りより 0.1mm 程度低くなった長方形（1x10mm 程度）の隙間（窪み）を拡大して示した写真である。写真を撮るにあたっては周りの試料や固定板は取り外してあり、その部分はプラズマに曝されていないため本来に色を保っている。隙間の着色（不純物原子の堆積）は設置場所によって大きく異なるのみならず、均一に着色した隙間もあれば、一部のみ着色したものもある。着色は正味の不純物堆積量（全堆積量－全損耗量）で決まり、水素プラズマによるスパッタリングにより損耗起こったと仮定すると、以下の

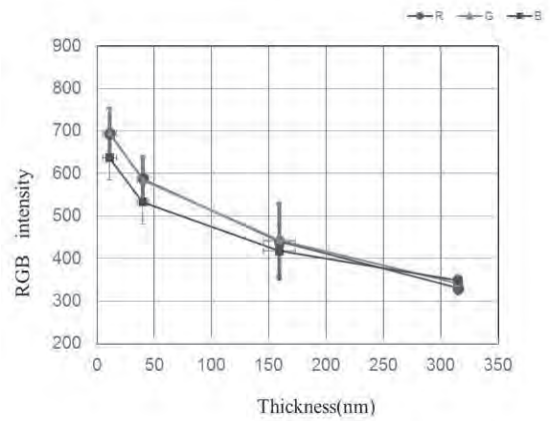



図４　RGB 値と堆積層の厚さとの関係

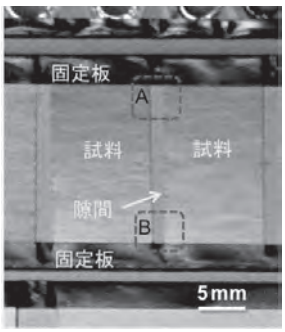



図５　プラズマ曝露試料の固定状況。赤線で囲った試料の隙間分部を図６に示した。

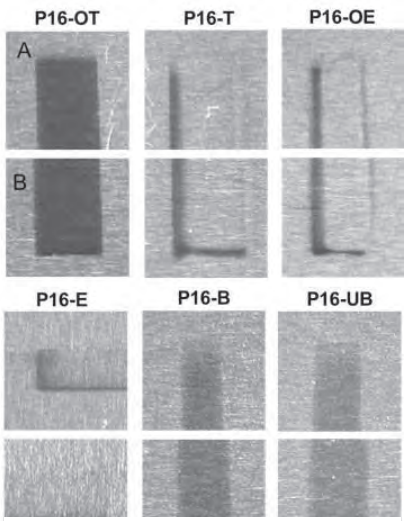



図６　各所において試料の間に積もった不純物

ことが推論できる。

① 不純物（C, Fe, Cr, W など）は壁の全面に飛来しているが赤道線より上側で多くなっている。
② 不純物原子の飛来方向は、ほぼランダムである。
③ 損耗を起こす水素の飛来は設置場所依存性が強い。上部壁半ばから赤道線までの間では水素のフラックスが高く、損耗ドミナント（堆積速度＜損耗速度）となっており、表面には両者の動的なバランスにより僅かの不純物原子が存在する。
④ 隙間周辺部の堆積層の付き方から上部壁半ばから赤道線までの領域では水素は左下から右上方約 20° の角度でまた壁面に対しては 20～25° 度程度の角度で入射していることがわかる。
⑤ 赤道面より下の領域では不純物原子の飛来は少ないが、損耗を起こす水素は更に少なく徐々に正味の堆積が起こっている。ただし、キャンペーンによっては損耗ドミナントな時もあり際どいバランスで堆積が優位となっている。
⑥ 最上部は　不純物堆積 ≫スパッタリング損耗　の状況にあるが、水素のフラックスが他の場所よりはるかに低いということが主な原因であると思われる。

上述の実験結果から、QUEST の水素リサイクリング過程を精度良く評価するにあたっては、赤道面より上側の損耗ドミナントな領域と赤道面より下側の穏やかな堆積ドミナントな領域についてそれぞれ水素の吸蔵・放出過程を議論する必要があることが判った。粒子バランスのモデリングにはこれらの表面についてのバランス方程式を連立させることにより精度の良い評価が可能になると思われる。

詳細は省略するが、2014SS でプラズマ曝露し不純物が 20nm 程度堆積したステンレス鋼は従来見られなかった水素の吸蔵・放出挙動を示すことが明らかになった。水素リサイクリングを大幅に変える可能性のある現象であり、来年度の課題として詳細な検討を予定している。

学会発表

1. PSI2014 (Kanazawa, 2014.5), “Plasma Facing Surface and Retention and Desorption of Hydrogen in QUEST”, N. Yugami, N. Yoshida, K. Matsumoto, T. Fujiwara, K. Araki, R. Yoshihara, H. Watanabe, K. Hanada, H. Zushi, Y. Hatano, Y. Oya and K. Okuno
2. PSI2014 (Kanazawa, 2014.5), “Temperature impact on W surface exposed to He plasma in LHD and its consequences for the material properties”, E. Bernard, R. Sakamoto, N. Yoshida, H. Yamada and LHD group
3. PSI2014 (Kanazawa, 2014.5), “Retention and Desorption of Hydrogen and Helium from Stainless Steel Exposed to Plasmas of LHD”, N. Yoshida, N. Yugami, Y. Kimura, H. Harada, T. Fujiwara, K. Araki, R. Yoshihara, H. Watanabe, M. Tokitani, S. Masuzaki, Y. Hatano, Y. Oya and K. Okuno
4. Hydrogen Workshop (Toyama, 2014.6), “Application of TEM for Nanoscopic Understanding of Plasma-Wall Interaction”, Naoaki Yoshida
5. Plasma conference 2014 (新潟, 2014.11) ”QUEST プラズマ対向壁の水素吸蔵・放出特性(2)”, 湯上尚之, 吉田直亮,藤原正, 荒木邦明, 吉原麗子, 渡邉英雄, 花田和明, 図子秀樹, 波多野雄治, 大矢恭久, 奥野健二
6. プラズマ・核融合学会九州・沖縄・山口支部会支部大会（春日、2014.12）, “QUEST における壁の色測定による膜厚評価”, 下地貴大, 花田和明, 吉田直亮, 図子秀樹, 他 14 名

# 26 FP-21

## 構造材料中の水素挙動に及ぼす照射損傷の影響

茨城大学工学部　車田　亮

### 1.　研究目的

核融合実験装置等の構造材料は、プラズマ対向材料を透過した中性子損傷を受けるとともに、重水素やトリチウム等が材料内部に拡散すると考えられる。一方、構造材料のき裂進展や破壊には、応力腐食割れ（SCC）や活性経路割れ（APC）等がしばしば問題となり、その 1 つの要因として材料中の水素の影響が懸念されている。そこで、本研究では、構造材料（ステンレス鋼等）中の水素の透過・放出挙動が、照射環境下でどのように変化するかを調査することを目的とする。そのために、茨大の水素マイクロプリント法（HMPT）や昇温脱離ガス分析装置（TDS）と、九大応力研の高エネルギーイオン発生装置や SEM・TEM の微細組織観察装置を共同研究に利用する。その結果、材料に関する豊富な知識と経験を共有しながら、核融合実験装置等の構造材料中の水素の透過・放出挙動を解明することにより、重水素やトリチウムと構造壁との相互作用を抑制・制御できる知見を得て、核融合実験装置等の構造材料の健全性および実用寿命の延長に貢献する。

### 2.　実験方法

#### 2.1 試料

試料には、高強度鋼の欠点である応力腐食割れや粒界腐食の発生を抑制した準安定オーステナイト系ステンレス鋼（SUS304L）を用い、試験片形状は、JIS 規格に基づくダンベル形引張試験片をワイヤーカット放電加工機により切り出した。その後、$H_2SO_4$ 水溶液(pH=2.0, 触媒：0.1[mass% $NH_4SCN$])を用いて、陰極を試験片、陽極を Pt とし、電圧 10[V]、電流密度 10[mA/cm$^2$]、30[min]の電気分解を利用した水素チャージを実施した。

#### 2.2 水素マイクロプリント法(HMPT)

水素マイクロプリント法（HMPT）は、材料を鏡面仕上げした後、水素ガスチャージや電解水素チャージにより水素原子を材料中に浸透させ、その後、写真用乳剤中の臭化銀の水素還元反応により還元された銀粒子の場所と量を SEM・TEM 観察することにより、材料中の水素の透過・放出挙動を解明することができる。ここで、写真用乳剤中のハロゲン化銀と鋼材中から放出される水素の化学的な還元作用は、下記の反応式により表される。

$$Ag^+ + H \rightarrow Ag + H^+ \qquad (1)$$

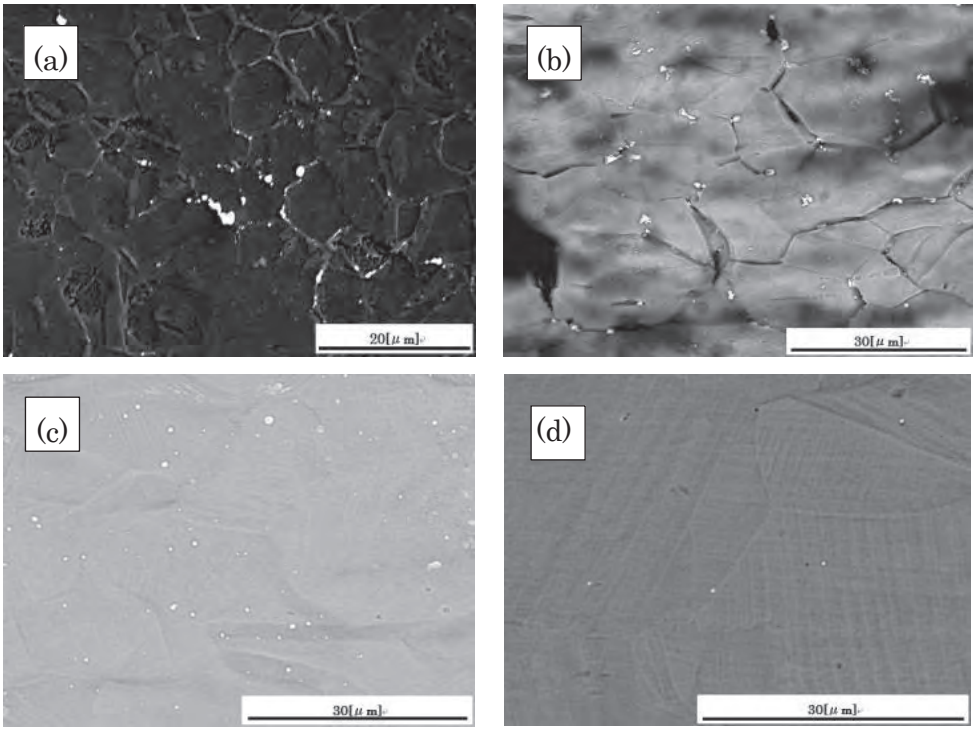
#### 2.3 引張応力負荷

水素チャージした試験片に写真用乳剤を塗布した後、観察面を遮光した状態で、引張速度 0.5[mm/min]と 0.005[mm/min]の負荷速度で、引張強度の 90[%]まで引張応力負荷を実施した。

### 3.　実験結果及び考察

Fig.1 は、陰極水素チャージを施した観察面の HMPT/SEM 画像を示した。ここでは、水素侵入面を IS、水素透過面を TS とし、電気分解による水素チャージを EHC で表わした。(a)は無負荷材の侵入面 SEM 画像を示した。水素放出箇所を表す銀粒子は局所的に粒界から検出され、検出量も少なかった。(b)は引

張速度 0.5[mm/min]の引張応力負荷材の侵入面 SEM 画像を示した。無負荷材よりも銀粒子の検出量が約 1.4 倍増加し、粒界以外に粒内からも検出された。これは、塑性変形によって増大した転位による水素の輸送が要因と考えられた。(c)は引張速度0.005[mm/min]の引張応力負荷材の侵入面SEM画像を示した。銀粒子の検出箇所は粒界と粒内の両方であり、検出量は無負荷材の約 2.2 倍となった。これは、低速引張による加工誘起マルテンサイト相中の水素拡散や転位による水素の輸送が要因と考えられた。(d)は引張速度 0.005[mm/min]の引張応力負荷材の透過面 SEM 画像を示した。侵入面と比較して銀粒子検出量が明らかに減少していた。この理由として、低速引張であっても侵入面からの水素放出が主となったことが考えられた。




(a)IS without tensile loading, (b)IS after tensile loading (0.5[mm/min]),
(c)IS after tensile loading (0.005[mm/min]), (d)TS after tensile loading (0.005[mm/min])

Fig.1 HMPT/SEM images after EHC

## 4. まとめ

本研究は、構造材料（SUS304L）中の水素侵入・放出挙動に及ぼす応力負荷の影響を、水素マイクロプリント法（HMPT）により究明した。その結果を以下に示す。

[1] 水素の主な放出経路は粒界であり、塑性変形に伴う転位の移動により粒内からも少量放出された。

[2] 引張応力負荷材の場合、塑性変形に伴う転位とその回りの応力場に高い水素集積が生じ、水素放出量が無負荷材の約 1.4 倍に増加した。

[3] より低速で引張応力負荷材の場合、水素が加工誘起マルテンサイト相中も拡散し、水素放出量が無負荷材の約 2.2 倍に増加した。

[4] 透過面においては、より低速で引張応力負荷した場合であっても、侵入面からの水素放出が主なため、水素の放出量は全体的に極めて微量となった。

# 26 FP-22

## タングステン材料の高熱流束負荷下における損傷変化と熱応力評価

茨城大学工学部　　車田　亮

**【目的】**プラズマ閉じ込め実験装置の第一壁・ダイバータのアーマ材には、高温特性及びスパッタリングによる損耗特性などに優れ、さらに水素リテンションの少ないタングステン(W)材が使用される。たとえば、ダイバータに使用される際には、再結晶温度の 1300℃程度以下で使用される。本研究では、これらを踏まえ、タングステンの延性脆性遷移温度(DBTT；350℃程度)以上の高温領域に着目し、W 材を使用する際、熱負荷や接合等により発生する応力が引き起こす弾塑性変形による表面形状及び内部組織変化、亀裂発生、破壊、寿命低下等の材料挙動を明らかにする。特に、大型プラズマ閉じ込め装置のダイバータ板の開発を進める上では、まず、要素材料の試作・評価を行い、これを元にさらに改良材を作製し、試験用の小型モックアップ、プロトタイプのモックアップ等を作製・評価し、実機サイズのダイバータ板の製作を完成させる必要がある。このため、要素材の特性評価は最も基本となるものである。しかし、要素材とダイバータ板では、その実験及び使用条件が大きく異なり、ダイバータ板に使用された際の性能を、要素材で評価する方法を確立することが必要である。本年度は、要素材の熱負荷特性評価法を確立するために、W材の熱負荷実験を行い、温度変動下において人工的に熱応力を負荷し、その際発生する損傷を調べた。また、熱解析と比較することによる定量評価も行った。

**【実験及び解析】**実験には、粉末焼結材（ITER Grade W；IG W）とその再結晶処理材（RC IG W）を使用した。試料サイズは 10mm×10mm×1mm で、実験前に電解研磨を行った。また、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用いた。熱源として電子ビームを用い、試料は Cu 製の強制水冷却を行っている試験台にφ5mm 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 20 kV で、ビームサイズは約φ3mm、2 秒間の照射で試料表面が約 1300℃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。さらに、熱負荷実験時の試料の温度分布や熱応力の定量的な評価を行うために、有限要素法を用いた熱および応力解析を行った。解析に使用したモデルは対称性を利用し、実験で使用した試料の 1/4 モデルとした。これにより計算時間の短縮を図った。試料へ負荷される熱流束は、実験とほぼ同じ熱流束の 40 MW/m$^2$ で、φ3 mm の部分を照射した。試料と冷却台には、温度依存性を考慮した熱伝導率、熱膨張率、比熱、密度を定義した。応力解析では、弾性域だけではなく塑性域に達した際の、試料に生じる応力やひずみを正確に求めるために、引張試験結果から求めた応力-ひずみ曲線の温度依存性を定義した。この応力-ひずみ曲線には、2 直線近似したものを使用していており、使用した応力-ひずみ曲線を図 1 に示した。降伏応力は、温度が上昇するにつれて低下し、温度が高いほど塑性変形が起こり易いことが分かった。また、応力-ひずみ曲線は移動硬化則に従うこととし、バウシンガー効果を考慮した。これらの条件で解析を行い、熱流束を試料に負荷させた時から冷却に至るまでの温度分布と x、y、z 軸方向の応力分布及び Mises 応力分布の時間変化を求めた。

**【結果】**図 2 及び図 3 に、それぞれ、未処理材及び再結処理晶材に 200 回繰り返し熱負荷を行った各試料の SEM 観察結果を示した。繰り返し熱負荷前では、IG W の表面は滑らかで粒界などを識別することは困難だった。一方、RC IG-W では、表面は滑らかであったが、SEM 像の明暗により粒界が確認できた。これは、再結晶処理材であるため、結晶方位の違いによる入射電子線のチャンネリングにより発生

する SEM 像の明暗がはっきりしているためであると考えられた。熱負荷を 20 回繰り返し後、両試料で変形が生じた。IG W では結晶内に白線が確認でき、転位の移動により生じたすべり線であると考えられた。結晶粒界にも変形が生じているが、その程度は小さかった。RC IG-W では、IG W よりも表面が荒れていた。結晶粒内は IG Wより多くのすべり線が見られ、結晶粒界も凹凸が生じていた。40 サイクル後では、IG W 及び RC IG W 共に、新たなすべり線や結晶粒界部分の凹凸に大きな変化は見られなかった。70 サイクル後では、IG W では多少凹凸が激しくなっているが、大きな変化は見られなかった。RC IG W も同様に顕著な変化は確認できなかった。200 サイクル後、IG W の損傷が急激に進み、表面の凹凸は激しくなり、結晶粒内及び結晶粒界共に亀裂が確認できた。また、粒界に沿う剥離も観察された。図 4 には、ビーム照射開始 2 秒後の温度及び応力分布の熱解析結果を示した。温度は中心部表面で最も高く、電子ビーム熱負荷実験による最高到達温度とほぼ同じ温度である約 1300℃となった。また、中心から遠ざかるにつれて小さくなっていき、その勾配も緩やかになった。この温度分布により熱応力が発生し、中心部の表面では約 400MPa が負荷された。さらに、この熱応力により歪が発生し、中心部で最も大きくなった。また、熱負荷中の試料中心部分付近には、圧縮応力が働き、降伏応力を越え塑性変形が発生していた。これは、熱負荷実験でも中心部付近の試料表面にすべり線が形成されており、実験結果と一致していた。さらに、熱解析では、ビームを止めた後の冷却中には試料中心部付近に、引張応力が生じていた。熱負荷実験においても、試料中心部付近には粒界等にミクロな亀裂が観察されており、この冷却中に発生する引張応力によって形成されたものと考えられた。以上のように、実験と解析を比較することにより、試料の温度分布及び負荷される応力を評価し、要素材の定量的な熱特性評価を行うことができることを実証した。今後、実機装置のダイバータ板の温度及び応力分布を解析等で求め、その状況が要素材において実現できるか検討する。

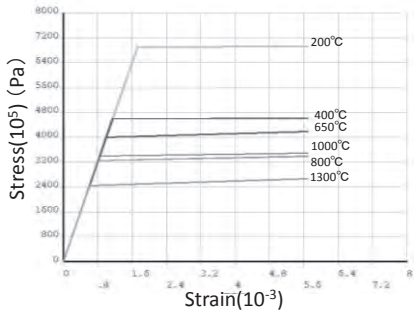



図 1 応力-ひずみ曲線（二直線近似）

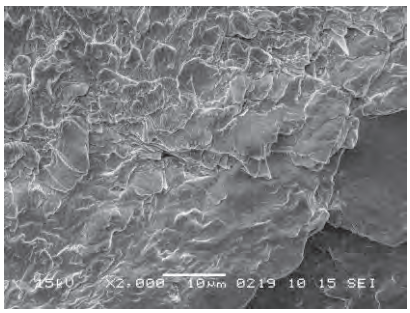



図 2 IG W の電子ビーム照射後の SEM 像

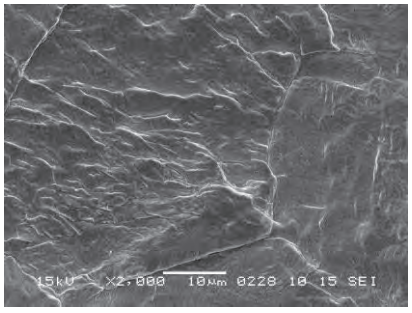



図 3 RC IG W の電子ビーム照射後の SEM 像

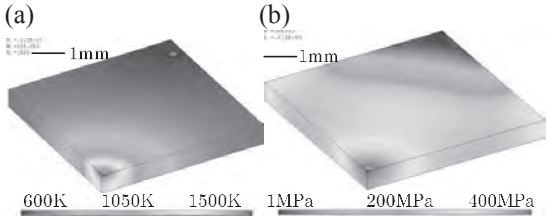



図 4 IG W の電子ビーム照射時の温度(a)及び応力(b)分布

# 多孔質金属膜における水素捕捉・放出挙動に関する研究

九州大学大学院総合理工学研究院　片山一成

**【緒言】** 利用時に環境負荷が小さい水素は、クリーンな二次エネルギーとして注目されており、水素の製造・貯蔵・輸送に関連する技術向上のため、高機能材料開発及び種々の材料における水素挙動の理解が求められている。ジルコニウムやパラジウムが優れた水素吸蔵能を有するのに対して、白金やタングステン(W)はほとんど水素を吸蔵しないことが知られている。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は、膜形成過程で多量の水素を捕捉することが明らかとなっている。応用力学研究所とのこれまでの共同研究により、重水素プラズマスパッタリングにより形成される W 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っている。このことから捕捉された水素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、W 堆積過程での水素捕捉機構については明らかとなっていない。本研究では、プラズマスパッタ装置内の異なる環境下における W 堆積量と水素捕捉量を調査し、W 堆積過程での水素捕捉機構について考察した。

**【実験方法】**　容量結合型 RF 水素プラズマにより W をスパッタリングして、基板上に W 薄膜を作製した。プラズマスパッタ装置の概略図を Fig.1 に示す。アルミニウム製の基板設置ステージは、下部のグラウンド電極上に固定した。スパッタターゲットとして W 板(ニラコ社製 50mm×50mm,厚さ 1mm)を上部の RF 電極に設置し、基板として W 箔(10mm×5mm、厚さ 0.2mm)及び石英片(10mm×5mm,厚さ 1mm)をステージの各位置に設置した。ターゲットを除く部分はステンレス製のメッシュでアースシールドをし、電極構造材の損耗を防いだ。グラウンド電極、基板設置ステージ及び真空容器は接地した。水素ガスは、マスフローコントローラーにより流量を制御して真空容器に導入した。ガス圧が安定した後、100W の RF 電力を印加して放電を開始し 310 時間放電を継続した。放電前後の基板質量変化をマイクロ電子天秤で測定し、堆積量を算出した。W が堆積した W 基板をアルゴン雰囲気で 100℃ずつ段階的に 800℃まで加熱し放出される水素量をガスクロマトグラフで測定した。なお、温度毎に水素放出が検出されなくなるまで測定を行った。石英基板は SEM 観察に用いたが本報告では省略する。

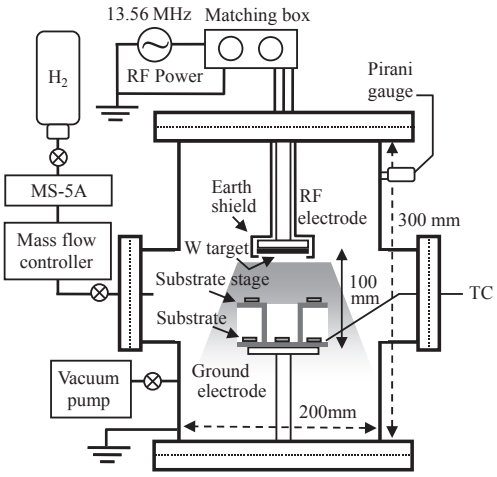



Fig.1 プラズマスパッタ装置概略図

基板設置位置の詳細を Fig.2 に示す。Fig.2(a)は装置上部から見た基板設置位置を示し、Fig.2(b)は装置断面から見た基板設置位置を示す。基板設置環境は次の 3 つにわけられる。

A 領域:プラズマと接し、ターゲットが見通せる。

B 領域:プラズマとは接さず、ターゲットが見通せる。

C 領域:プラズマとは接さず、ターゲットが見通せない。

堆積過程で装置内に存在する水素の形態を次の３つに分類する。

$H_I$:プラズマ中の水素イオン

$H_R$:ターゲットからの反跳水素

$H_M$:水素分子

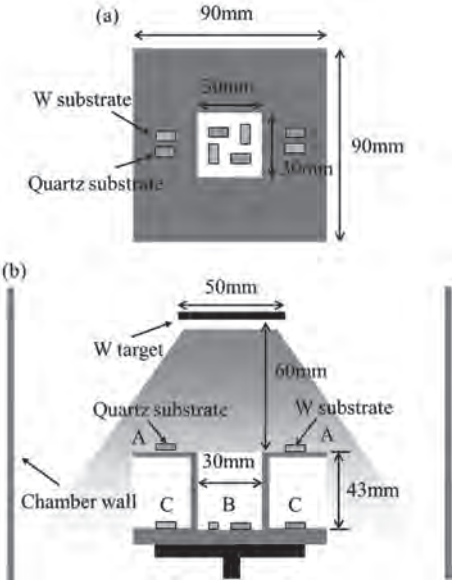



Fig.2 基板設置位置詳細図. 装置上部からみた基板設置位置(a), 装置断面から見た基板設置位置(b)

プラズマの空間電位は数 10V 程度であるため、接地された基板への水素イオンの入射エネルギーは数 10eV 程度である。ターゲット W には、およそ 1kV の自己バイアスが発生するため、1keV のエネルギーで水素イオンが衝突し、その多くは高エネルギーを保持して反跳される。エネルギー反射係数はおよそ 0.5 程度であるため、反跳水素はおよそ 500eV 程度の初期エネルギーでターゲットから飛び出し、水素分子との衝突でエネルギーを失いながら基板へ到達する。なお、10Pa$H_2$ 雰囲気での W 薄膜への水素分子の溶解量は極めて少ないと考えられる。

水素プラズマによりスパッタされた W 原子は、表面結合エネルギー(8.7eV)以上のエネルギーを持って飛び出し、気相中の水素分子との衝突でエネルギーを失いながら基板へ到達する。W 原子の質量は水素分子よりはるかに大きいため、1 回の衝突でのエネルギー損失は小さく、弾道的に基板へ衝突する W 原子が存在する。水素分子との衝突によりエネルギーを失った W は、プラズマ中或いは気相中を拡散・浮遊した後に基板へ到達する。気相中を浮遊する W 原子が拡散過程でクラスターを形成し、微粒子として堆積する機構も想定される。ここでは堆積機構により W を 2 つに分類する。

$W_B$:ターゲットから弾道的に飛来する W 原子

$W_D$:プラズマ中或いは気相中を拡散・浮遊した後に飛来する W 原子或いは W クラスター

各領域で薄膜形成表面に飛来する水素及び W を Table1 にまとめる。

Table 1 薄膜形成に寄与する水素および W の形態

| | $H_I$ | $H_R$ | $H_M$ | $W_B$ | $W_D$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 領域 A | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 領域 B | × | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 領域 C | × | × | ○ | × | ○ |

**【結果及び考察】** Fig.3 に領域 A,B,C に設置した W 基板への単位面積当たりの堆積量[mg/cm$^2$]と薄膜中の H/W 比を示す。水素原子数は、800℃までに放出された水素量から算出し、W 原子数は堆積量から見積もった。領域 A の堆積量が最も多く、周囲を壁に囲まれている領域 B の堆積量は領域 A の 1/3 程度であった。この結果は領域 A において、ターゲットから弾道的に飛来・堆積する機構($W_B$)よりも、水素分子との衝突を繰り返しながら全方位から堆積する機構($W_D$)の方が支配的であることを示す。領域 C にもわずかながら堆積がみられ、プラズマ中及び気相中を拡散・浮遊した後に飛来する W が存在することが確認された。薄膜中の H/W 比は、堆積量が最も少ない領域 C で最も高く、領域 A が最も低いことがわかった。Fig.4 に領域 A,B,C の W 薄膜から各温度で放出された水素量を H/W 比で比較する。水素放出挙動は領域ごとに大きく異なることがわかった。これは、水素捕捉機構の違いを反映している。これらの結果から、各領域での主要な水素捕捉機構について、一つの仮説として次のように考察する。領域 C では薄膜形成表面への水素イオン $H_I$、反跳水素 $H_R$ の入射はないため、プラズマ中を拡散・浮遊する W 微粒子に水素イオンが化学吸着し、水素を取込んだ W 微粒子が基板へ堆積する(捕捉機構 A)。領域 B では比較的高いエネルギーを持った反跳水素 $H_R$ が薄膜形成表面に打ち込まれることで水素が捕捉される(捕捉機構 B)。領域 A では反跳水素 $H_R$ の入射(捕捉 B)とプラズマ - 薄膜界面での水素イオン $H_I$ の W への化学吸着(捕捉機構 C)により水素が捕捉される。プラズマ中或いはプラズマ - 薄膜界面での水素イオン $H_I$ と W との吸着反応により捕捉される水素(捕捉機構 A,C)の放出ピークは 500~600℃と高く、薄膜に打ち込まれた水素(捕捉機構 B)の放出ピークは 300℃と低いことが示唆される。領域 A では、両機構で捕捉される水素が同程度あることから、ピーク位置が 400℃になったと推測される。今後さらに実験データを取得し、水素捕捉機構の解明を進める予定である。

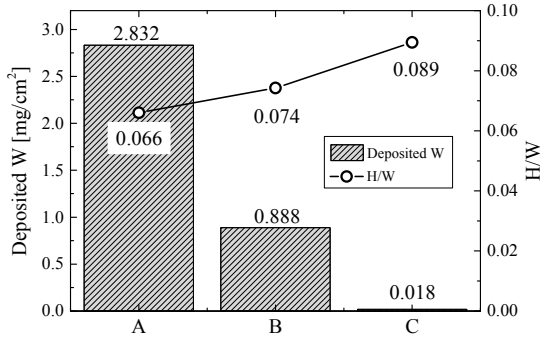



Fig.3 領域 A,B,C に設置した W 基板への単位面積当たりの W 堆積量と薄膜中 H/W 比

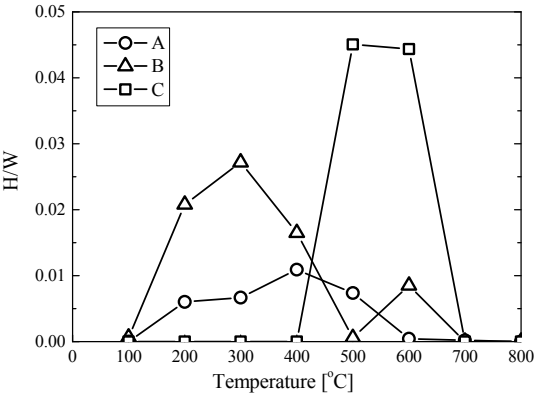



Fig.4 領域 A,B,C の W 薄膜から各温度で放出された水素量(W 原子数あたりの放出水素原子数)

【成果報告】


[1] K. Katayama, K. Uehara, H. Date, S. Fukada, H. Watanabe, "Temperature dependence of deuterium retention in tungsten deposits by deuterium ion irradiation", Journal of Nuclear Materials, In Press, Corrected Proof, Available online 3 December 2014.

[2] K. Uehara, K. Katayama, H. Date, S. Fukada, "Hydrogen gas driven permeation through tungsten deposition layer formed by hydrogen plasma sputtering", 28th SOFT, Sep 29th –Oct 3rd 2014, San Sebastian, Spain.

# 26 FP-24

ヘリウム照射によるタングステンの損傷組織形成に及ぼす照射温度の影響

核融合科学研究所　坂本隆一

**目的**

プラズマ対向材料として使用されるタングステンの材料強度特性，水素リサイクリング特性といったグローバルな特性に及ぼすヘリウムの照射効果を，素過程から理解することを目的として，ヘリウムプラズマや，ヘリウムビームで照射したタングステンの損傷組織変化を透過型電子顕微鏡観察するとともに，微小押込み試験や昇温脱離実験を行う．

ヘリウムは水素と比べて，材料中の格子欠陥との相互作用が強く，高温環境下でも材料中に捕捉され，損傷組織形成に大きな影響を及ぼすことから，ヘリウム灰が生じる核融合炉やヘリウム放電実験を行うITERの初期実験フェーズにおいて重要な課題となっている．本研究では特に，核融合炉第一壁を想定した，高温領域におけるヘリウム照射効果に着目した研究を行った．

**研究方法**

低エネルギーイオンビーム照射装置を用いて，温度制御されたタングステンへのヘリウム照射実験を行い，その照射損傷組織を透過型電子顕微鏡（水素動態観測装置）にて観察するとともに，微小押込み試験や水素イオンの追照射後の昇温脱離実験を行い，ヘリウム照射によるミクロな損傷組織変化が，機械強度や水素吸蔵特性といったグローバルな材料特性におよぼす影響を調べる．また，高エネルギーイオン発生装置にて，予め高エネルギーの重イオンを照射した試料へのヘリウム照射実験を行うことにより，損傷組織とヘリウムの相互作用に関する知見を得る．さらに，核融合科学研究所のLHDにて，高温環境下でヘリウムプラズマを曝したタングステンについても同様な観測を行い，イオンビームを用いたヘリウム照射実験との比較を行う．LHDプラズマへ曝した場合，弾き出し損傷を起こさない様な低エネルギー成分のヘリウムによる照射環境下にあり，この比較実験によって，材料中に注入されたヘリウムや，損傷組織が材料特性に及ぼす影響を明らかにする．

**実験**

今回の共同研究費は，タングステン照射試料作成（電解研磨と真空焼鈍）と高エネルギー重イオン予照射実験を，応用力学研究所にて行うための旅費として使用させていただいた．試料は0.1 mm厚のタングステン薄板を切り出して作成し，水酸化ナトリウム水溶液による電解研磨ののち，真空雰囲気中で1000 °Cを3時間保持する歪みとり焼鈍材と，約2000 °Cで15分保持する再結晶熱処理材を作成した．主に，電子顕微鏡観察用として，再結晶熱処理材を用い，その他の目的には歪み取り焼鈍材を用いた．

照射実験は核融合科学研究所のLHDの10.5Lポートに設置された試料駆動装置を用いて，真空容器壁位置まで挿入し，ICH加熱したヘリウム放電の周辺プラズマに曝した．照射時間は合計で約1000秒である．照射試料を載せた試料ホルダは，55 Wのセラミックヒータにて最大1300 Kまで昇温可能であり，今回の照射実験においては1073 Kに定温維持した．図1に高温試料ホルダの形状と温度分布を示す．ホルダには，透過型電子顕微鏡（TEM）用薄膜試料（3 mmディスク）に加えて，収束イオンビーム（FIB）加工による断面観察用試料（3 mmディスク），昇温脱離実験用試料（7 mm正方形，15 mmディスク）など，複数種類の試料を配置し，全試料とも同条件下で照射実

験を行った．試料ホルダを設置した真空容器壁位置では，主に荷電交換中性粒子による照射が主であり，数eVからkeVまでの広いエネルギー範囲の粒子負荷環境下に置かれ，弾き出し損傷に比べて，100倍程度多いヘリウム粒子が注入されていることが，エネルギー分布を考慮したTRIMコード計算より予測される（図2）．

また，中性子照射環境下におけるヘリウムプラズマ照射効果を調べることを目的として，応用力学研究所の高エネルギーイオン発生装置（加速器）にて，高エネルギー銅イオンの予照射実験を行った．

**実験結果と今後の計画**

LHDプラズマに曝したタングステン薄膜試料を透過型電子顕微鏡観察し，図3に示すようにヘリウムナノバブルが形成されていることを確認した．観測された損傷組織は，これまで行った1000 K以下でのLHDプラズマ照射による損傷組織と大きな違いはない．現在，FIBによる断面観察試料を作成しており，バブルのサイズや深さ方向分布を詳細に調べ，照射温度が損傷組織形成に及ぼす影響について調べる．また，銅イオン予照射したタングステンに対してもヘリウムプラズマ照射実験を行い，予め導入された照射欠陥がヘリウムバブル形成に及ぼす影響を調べる．

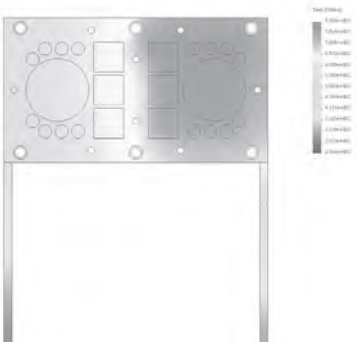


図1　高温ホルダ上の試料配置と温度分布．

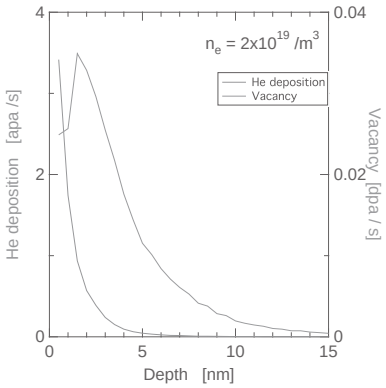



図2　荷電交換中性粒子のエネルギー分布を考慮して計算した，照射欠陥量とヘリウム粒子量

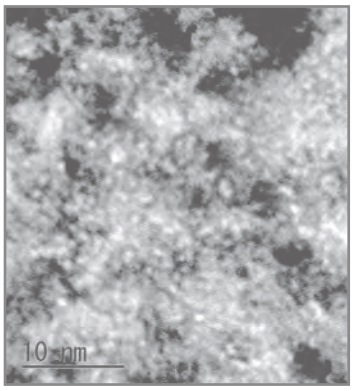



図3　LHDヘリウムプラズマ照射によって導入された，照射損傷組織（バブル）．

**研究成果報告（予定）**

- R. Sakamoto, E. Bernard, N. Yoshida et al., “High temperature helium irradiation of tungsten: multi technique defect characterization and additional H trapping”, 15th International Conference on Plasma-Facing Materials and Components for Fusion Applications (PFMC-15), 18—22 May 2015, Aix-en-Provence (France).

**研究組織**

研究代表者

核融合科学研究所，坂本隆一（男性，46歳）

研究協力者

核融合科学研究所，Elodie Bernard（女性，30歳），現・Aix-Marseille大学

九州大学 応用力学研究所，吉田直亮

九州大学 応用力学研究所，花田和明（所内世話人）

九州大学施設利用に係る報告書

「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 5)」

日本原子力研究開発機構 大洗研究開発センター
福島燃料材料試験部 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、PNC316 鋼と同じオーステナイト鋼であり耐スエリング特性に優れた高 Ni 鋼の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開発を目指している。高 Ni 化や高温域でも安定な析出物の均一化等により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を行い、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。

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℃、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。

また、高 Ni 鋼（15Cr-43Ni、γ’/γ”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℃、200dpa として、今回は応力無負荷での微細組織観察試料とした。挙動評価の比較材として、Self イオンで

ある Ni イオンを、照射温度 500、550、600、650、700℃、照射量 100dpa で照射した高 Ni 鋼（15Cr-35Ni、炭窒化物析出型）試料も観察試料とした。観察試料の作製にあたっては、九州大学応用力学研究所設置の収束イオンビーム加工観察装置を用いた。

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℃、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。

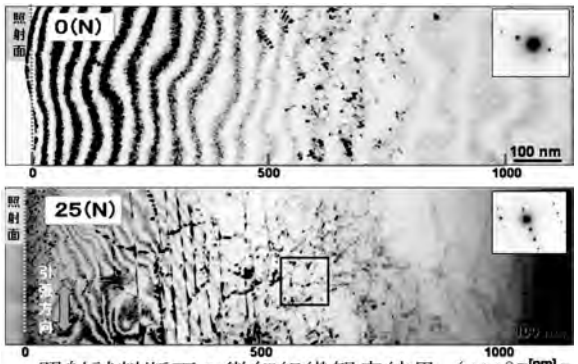



図 1　照射試料断面の微細組織観察結果（400℃, 5dpa）

応力無負荷における高 Ni 鋼（15Cr-43Ni、γ'/γ"弱析出型）の 700℃、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γ'/γ"（$Ni_3(Ti,Al)/Ni_3Nb$）析出物は安定に存在していた。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。

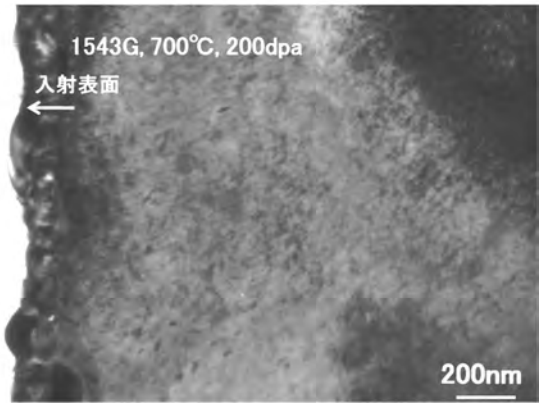



図 2　照射した高 Ni 鋼試料断面の微細組織観察結果（700℃，200dpa）

また、応力無負荷における高 Ni 鋼（15Cr-35Ni、15Cr-43Ni）の 500～650℃、100dpa 照射等におけるスエリング挙動の結果概要を図-3、組織変化を図-4 に示す。高 Ni 鋼のスエリングピーク温度は、600℃近傍であり、微細組織の観察結果からボイドが形成されていることを確認した。また、550℃、650℃では顕著なボイドスエリングは確認されず、600℃においてボイドが大きく成長することを確認した。今後は、析出物分布状況の詳細を評価するとともに、冷間加工等を加えて更なる耐スエリング特性を改良した高 Ni 鋼材の損傷挙動を評価する。

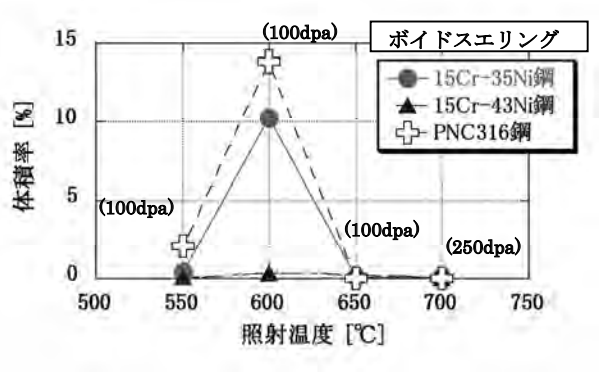



図3　照射した高Ni鋼のスエリング抑制の照射温度依存性(図中の括弧内は照射量を示す)

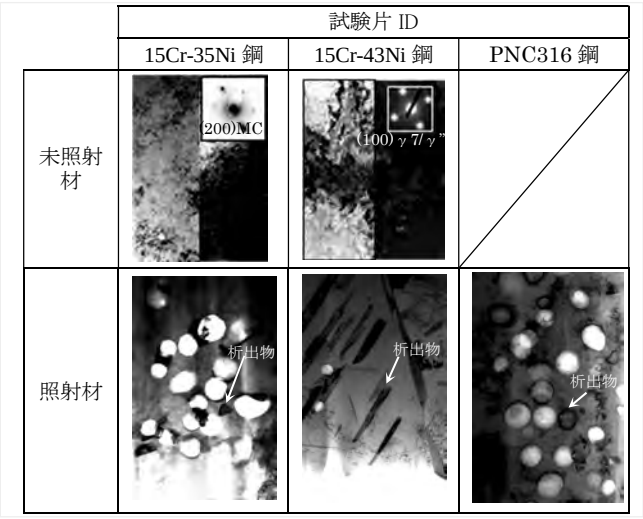



図 4 未照射材(左側:明視野、右側:暗視野)及び 600℃、100dpa トリプル照射材の微細組織

# 26 FP-26

## QUEST 装置における ECH プラズマ分光のための CCD 雑音の経年変化に関する研究

核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・森田繁

**課題番号：**26FP-26
**研究課題：**QUEST 装置における ECH プラズマでの希ガス不純物の振舞いに関する研究
**研究期間：**H26 年 4 月 1 日－H27 年 3 月 31 日
**所内世話人：**図子秀樹
**協力者：**５名（森田繁，大石鉄太郎，黄賢礼，張洪明，Santanu Banerjee）
**配分額：**研究費（３０千円），旅費（１０２千円）

**目的：**

不純物分光のために QUEST では VUV 分光器，LHD では EUV 分光器を使用している．QUEST では ECH で加速された高エネルギー電子が放射する硬 X 線が真空容器を貫通して，LHD では NBI に起因した高エネルギー中性粒子が回折格子で反射して CCD 検出器に到達し，大きな雑音の発生源となる．これら硬 X 線や高エネルギー中性粒子の CCD 検出器に与える損傷の経時変化について研究した．今回の結果は中性子による CCD 検出器損傷を推測するための参照データとして有用な情報を与える．

**実施方法：**

QUEST に設置した 20cm 直入射真空紫外分光器と LHD に設置した EUV 分光器の同じ背面照射型 CCD 検出器で検出された雑音を比較し，検出器性能の経年変化を調べる．QUEST には 2008 年度に，LHD には 2004 年度に同型の CCD 検出器を設置し，計測を継続している．

図１ 背面照射 CCD 検出器

**実験結果：**

QUEST では放電密度が低いので逃走電子のエネルギーが大きく，最大 1MeV 程度までの硬 X 線が装置から放射される．装置から 2m 程度の距離に設置された CCD 検出器には容易に硬 X 線が貫通し，大きな雑音を生じさせる．図２(a)にその典型的な硬 X 線によるスペクトルを示す．すべて硬 X 線による雑音であり，VUV スペクトルは雑音に比べ強度が弱く認識することは難しい．それぞれの雑音パルスの波高を解析することにより，CCD に検出されている硬 X 線のエネルギー分布を得ることができる．結果を図２(b)に示す．おおよそ 80keV 程度のまでの硬 X 線を検出していることが分かる．

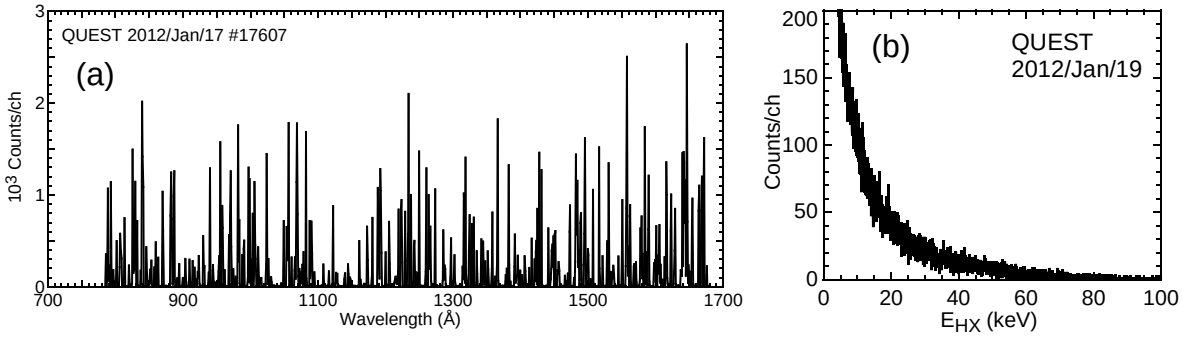



図２(a) QUEST で観測される硬 X 線による雑音パルス　(b) 硬 X 線エネルギー波高分布

無電流プラズマを生成する LHD では硬 X 線は発生しないが，NBI ビームに起因した高エネルギー中性水素粒子がプラズマから放出される．その高エネルギー粒子は EUV 分光器の回折格子で反射され CCD 検出器に到達する．特に低密度放電ではビームの減衰時間が長く，より多くの高エネルギー粒子が観測される．図 3 (a)にその典型的な高エネルギー粒子によるスペクトルを示す．EUV スペクトルは唯一 67.4 Åのところに CVI の 2 次光が確認できる．QUEST の場合と同様に，その雑音パルスの波高を分析することにより CCD にやってきている高エネルギー粒子のエネルギー分布を求めた．結果を図 3 (b)に示す．最大で 150keV までの粒子を観測でき，このエネルギーは 180keV で入射されている負イオン NBI に対応する．正イオン NBI の入射エネルギーは 40keV である．

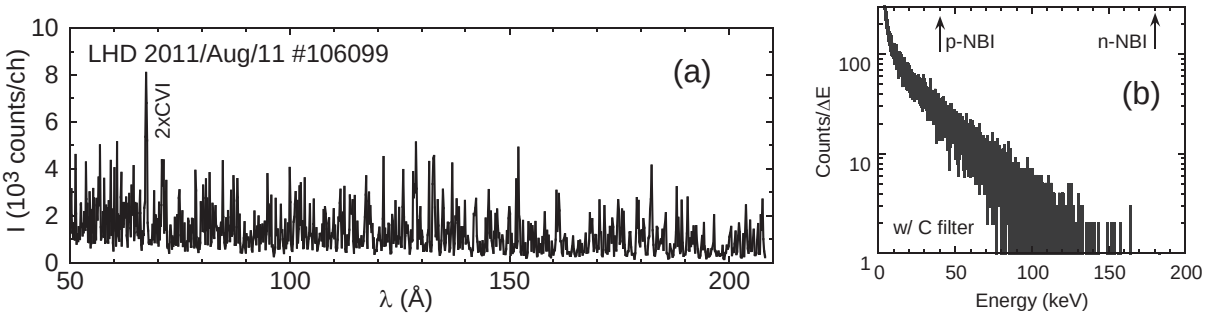



図 3 (a) LHD で観測される高エネルギー中性粒子による雑音パルス　(b) 高エネルギー粒子波高分布

QUEST では 8 年間，LHD では 12 年間，同じ CCD を継続して使用した．従って CCD 検出器はその期間の間，硬 X 線もしくは高エネルギー粒子の照射を受けたことになる．そこで，CCD 検出器で得られるスペクトルを使用し始めた時期とごく最近の時期とで比較した．紙面の都合上，ごく最近得られたスペクトルのみ図 4 に示す．図 4 (a)は QUEST からの VUV スペクトル，(b)は LHD からの EUV スペクトルである．LHD のデータはネオンをパフした放電から得られている．長年の硬 X 線や高エネルギー中性粒子の照射にも関わらず，スペクトルには全く雑音らしきものは観測されていない．使用し始めに得られたスペクトルと同様の性能を示しており，全く CCD 検出器に損傷は見当たらない．また，2 次元の画像でスペクトルを観測しても，CCD 素子の損傷を示す白い斑点も全くない．結論として，通常の核融合装置で観測される硬 X 線や高エネルギー粒子照射量では CCD 検出器は損傷を受けないことが分かった．

硬 X 線は CCD 素子内の電子に吸収され，また，高エネルギー粒子は CCD 検出器のごく表面で電子を励起する．中性子は CCD 素子を構成する原子そのものを移動させると考えられるので，お互いの影響を直接には比較できないが，今回得られたデータは今後の分光計測にかかる中性子影響についての参考となる．

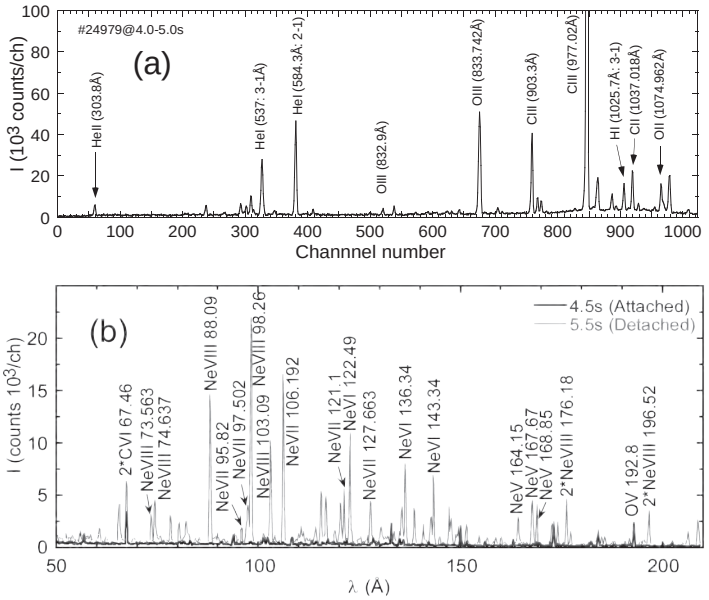



図 4　最近観測した(a) QUEST の VUV スペクトル及び(b) LHD の EUV スペクトル．

平成 26 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。そして、非平衡系プラズマの統計力学を構築する事を目指す[1, 2]。

**実験観測の進展**

「遠非平衡」という概念が用いられる時、熱平衡からの乖離の度合いが定量化出来るのではないかという直感的な見方が底流にある。乖離の度合いをどのように記述するかは、現在プラズマ物理学の中心課題である。

熱平衡の近傍では、巨視的な観測量のダイナミクスと、それらの輸送を司るミクロな揺動との間に、明確なスケール分離が成り立つ。解析対象とする現象を記述する輸送係数は、その対象のスケールに依存しない「輸送係数（輸送行列）」となる。スケール分離がもし成り立つなら、ミクロ揺動の特性時間・特性長は、巨視的観測量の時空定数より格段に短く、巨視観測量が変化する各瞬間に、巨視変数に応じた定常状態に達しているはずであり、ミクロ揺動のもたらす輸送量は、巨視変数に応じた値を取ると予想される。この考え方が「局所クロージャー」仮説（輸送係数が、その位置その時刻の巨視的変数で表現される、という仮説）である。

本共同研究では、理論・実験にわたる総合的な研究を展開し、輸送量と巨視的変数との間の局所クロージャー仮説の破れを詳細に検証した[2]。

実験では、輸送現象での局所クロージャーの破れを確認する大きな進歩を得た。Inagaki らは、時間変動する熱源に対し、プラズマの温度勾配や熱流が動的に変動する現象を観測し、温度勾配 grad $T$ と熱流 $q$ とが

$$q/n = -\chi \,\mathrm{grad}\, T$$

のような一価の関数（拡散的関係）を示すのではなく、ヒステリシスを持つ事を発見した[3]。（$n$ はプラズマ密度。）右図に実験結果を引用する。従来、輸送関係が L-H 遷移のよ

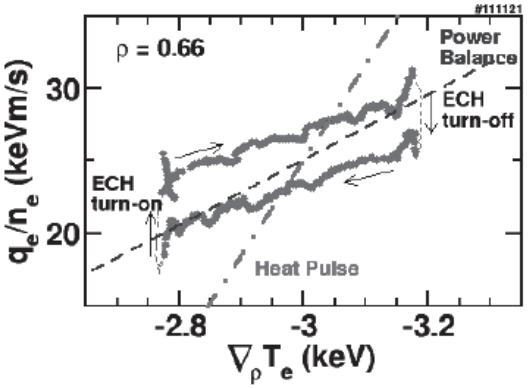



**図 1**：勾配–熱流関係のヒステリシスが発見された。[3]

うな場合[4]を除き一価の関係にあると信じられて来た。そして、その仮説のもと、輸送関係がどのようなものか探索されて来た。この図で、実線は、Inagaki らの実測によるヒステリシスを含む輸送関係である。点線や一点鎖線は、一価関数としての当てはめを（定常バランスの比較や周期熱伝播観測という）二つの方法で試みたものである。両者がかけ離れている事は何十年来の謎であった。Inagaki らの発見は、輸送の応答が更に高い次元に埋め込まれたものである事を明示した。詳細に温度変動の時空構造を分析したものが図２である[5]。図２は、左側が拡散モデルの場合の振る舞い、右側が実験観測（図１をもたらす状況）である。それぞれ、最上段が周期的な入力の変動、中段が規格化半径(r/a) 0.37（加熱部の少し外側）, 0.82（加熱部から離れた下流）での周期的温度変動を示す。最下段は、温度変動の時間・半径面上の全体像である。時間は、図中央が加熱入力の終了時に揃えられ、$t < t_0$ では加熱、$t > t_0$ では休止という位相にある。周期的な加熱変化に対応して、下流の位置では、温度変化が位相遅れを持つ。拡散的モデルの場合では、変動値が 0、最大、最小のそれぞれを比較すると、下流の離れた位置では、いずれもほぼ同じような位相遅れを示す。（一つの時定数を持つ。）こうした従来の予想とは異なり、実験観測では、変動値が 0 の位相は拡散モデルと類似の遅れを示すが、加熱 on-off の状況の伝達は、ずっと速い時定数で伝達されている。明らかに複数の時定数が共存している。従来見逃されていた本質的な問題を発見したと言える。

この観測の普遍性を確認する為の努力を続けた。例えば、畳込み法を採用した事で、加熱変動周波数の高調波迄高精度で観測する事が可能になった。５次、７次、９次等の高調波の空間分布を比較する事で、単純な拡散モデルが破れている事を確認する方法を示した[6, 7]。これにより、稠密な計測が可能な大型装置だけではなく、限られた少数の位置のみに観測データが限られるような状況にあっても、輸送の局所クロージャーの破れを実験的に観測する事が可能になった。多数の実験観測や理論解析を総覧する総合論文をまとめ発表した[2, 8]。

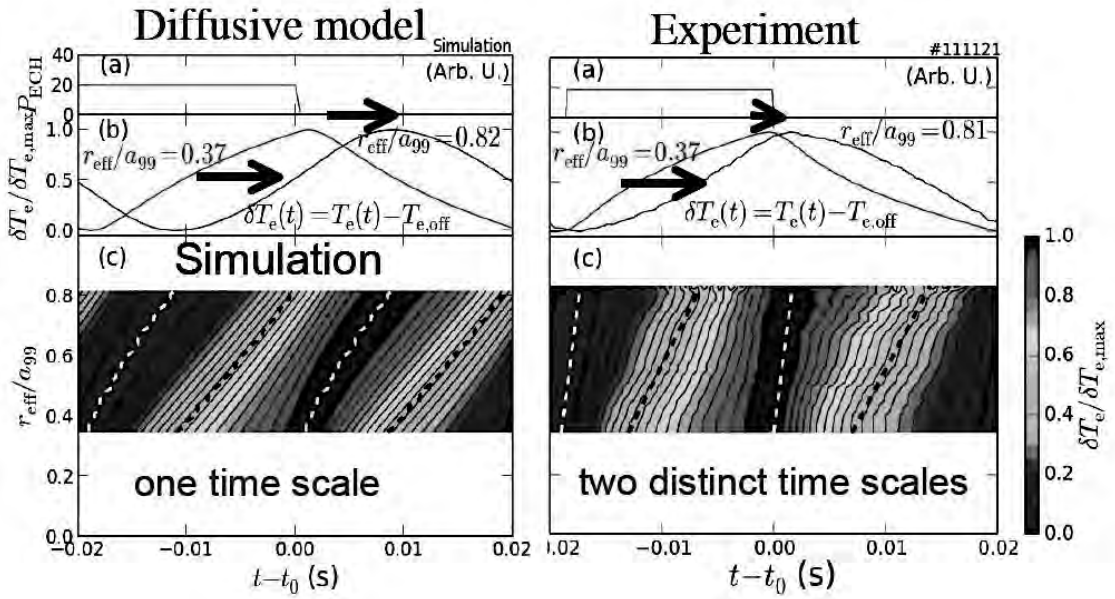



**図２**：周期的な時間変化を持つ加熱モジュレーションに対する温度摂動の時空変化を示す。左側が拡散モデルの場合の振る舞い、右側が実験観測（図１をもたらす状況）。最上段：周期的な入力の変動。中段：規格化半径(r/a) 0.37, 0.82 での周期的温度変動。最下段：温度変動の時間・半径面上の全体像である[5]。

## 新しい熱力学変数

この Inagaki らの発見は、温度勾配や密度勾配等の、従来考えられていた熱力学変数の他に、輸送を司る新しい熱力学変数がある事を示している。

理論的にこの問題に取り組み、プラズマの位相空間まで乱流輸送の問題を拡張した。そして「分布関数を変形する力」に着目する事で、プラズマの加熱入力が直接に熱流を変化させる可能性を指摘した[9, 10, 11]。従来の解析は、分布関数の変化（マックスウエル分布からのずれ）を考察することはあったが、「分布関数を変形する力」に着目する事は無かった。その力を表現するパラメタとして

$$\Gamma_h = \frac{\gamma_h}{\chi_N k_\perp^2} = \frac{\delta P}{\delta p} \frac{1}{\chi_N k_\perp^2}$$

が提案されており、新たに非平衡性を表現するパラメタ$\Gamma_h$が導入された。乱流輸送係数は $1/(1-\Gamma_h)$ という依存性を含む事が示された。$P$ は加熱入力であり、直接加熱入力が乱流や輸送に影響する様相が示された。更に$\Gamma_h$ が 1 に近づくときの理論式も求められた[12]。

Inagaki らの観測は、分布関数のマックスウエル分布からの顕著なずれを作る前に熱流が変化している事を示している、それがヒステリシスに現れる。新たな熱力学的な力の必要性を支持している。プラズマの乱流輸送の根本問題を解決する為の今後の研究の方向を示している。

## H-mode 研究の進展

時間空間におけるスケール混合のなかで代表的な現象としては L-H 遷移があげられる。その問題について、遠非平衡系の物理の視点から研究した。そこでは、巨視的な径電場と急峻な勾配、メゾスケール揺動の帯状流やドリフト波等が共存している。径電場分岐モデルに立脚し、遷移条件を詳細に検討した[13]。先進データ解析法を活用し、L-H 遷移における時空ダイナミックスの次実験観測を取りまとめて発表した[14]。

## 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.-I. Itoh, et al.: Project review J. Plasma Fusion Res. Vol.90, No.12 (2014)793
[3] S. Inagaki, et al.: Nucl. Fus. **53** (2013) 113006
[4] S.-I. Itoh and K. Itoh, Phys. Rev. Lett. **60**, 2276 (1988).
[5] S.-Inagaki, et al.: Dynamic method to study turbulence and turbulence transport , IAEA Conference on Fusion Energy, 2014, St. Petersburg, paper EX2-1
[6] S. Inagaki, et al.: Plasma and Fusion Research **8** (2013) 1202173
[7] S. Inagaki, et al.: Plasma and Fusion Research: Rapid Comm. **9**, 1202052 (2014)
[8] K. Ida, et al.: Nucl. Fusion **55** (2015) 013022
[9] Itoh, S.-I. and Itoh, K.: Sci. Rep. **2** (2012) 860
[10] Sanae-I. Itoh, Kimitaka Itoh: Nucl. Fusion **53** (2013) 073035
[11] Yusuke Kosuga, Sanae-I. Itoh, Kimitaka Itoh: JPS Conf. Proc. , **1**, 015002 (2014)
[12] K. Itoh, et al.: ITC 24 (2014) paper I3.
[13] S.-I. Itoh and K. Itoh: Nucl. Fusion 54 (2014) 114017
[14] T. Kobayashi, K. Itoh, et al.: Nucl. Fusion **54** (2014) 073017

# 先端電子顕微鏡を用いた粒界破壊の動的観察実験

東北大学　金属材料研究所　松川義孝

・目的

本研究は、応用力学研究所に今年度に導入された最新鋭の球面収差補正機構付き透過型電子顕微鏡 JEOL JEM-ARM200CF の機能を最大限に活用した、原子力材料の構造寿命予測モデルを確立するために必要不可欠な基礎研究である。原子力材料の寿命を損なう脆化モードの一つである粒界破壊は、材料中の結晶粒界に偏析した不純物が原因で起こることはよく知られているが、そのメカニズムの詳細は未だ明らかではない。例えば、申請者は最近、割れた粒界の両破面を精密に組成分析した結果、同じ粒界であっても不純物濃度が場所によって異なることや、粒界は必ずしも偏析濃度ピークのところを境にして均等に割れる訳ではないことを見出した（Fig. 1）が、これらは従来の理解・予想を覆す全く新しい知見である。本申請研究では、これらの新知見を足掛かりにし、最新鋭の電子顕微鏡を用いて、技術的に難易度の高い実験を行うことで、“破壊の起点はどこか？”というマテリアルサイエンスの古典問題を解明することを目指す。

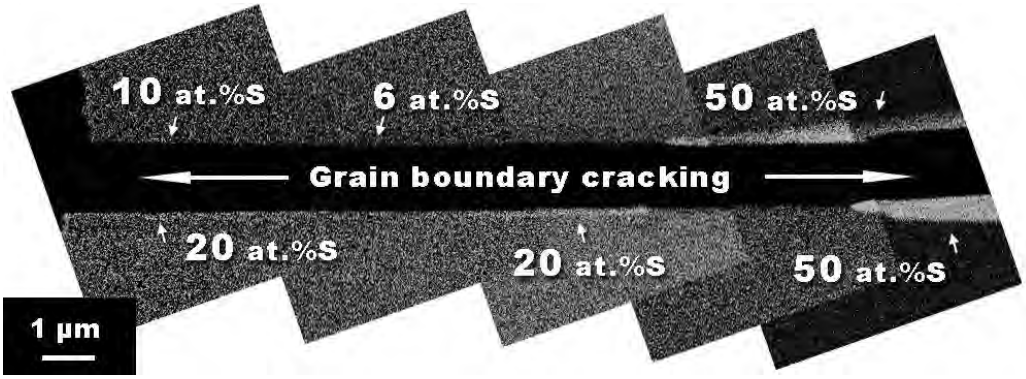



**Fig.1 |　不純物（硫黄）が偏析したニッケルの粒界割れの EDS マップ**

・実験方法

粒界に不純物を偏析させた金属試料を、透過型電子顕微鏡の中で引張り破断し、その破断過程を動的観察する（引張りホルダは自前の物を持参）。粒界に偏析した不純物の濃度を、破断前後で比較することによって、破壊の起点を不純物濃度の観点から議論する。組成分析に用いる EDS（エネルギー分散型 X 線分光）に関しては、S/N 比に優れた最高水準のものが装備されている（冷陰極電界放出型電子銃、コンデンサレンズの球面収差補正機構、直径 100 ミリの検出器）ため、偏析濃度が低い場合でも定量分析が十分可能であると期待できる。従来の電子顕微鏡では、割れた粒界（自由表面）の結晶格子縞を観察する際に、格子縞が実際の試料位置よりも外側まで滲み出てしまい、どこに現れた格子縞が粒界の真

の情報を反映しているのかがわからないという問題があった（image delocalization と呼ばれる問題である）。これは顕微鏡レンズの球面収差に起因する問題であり、本電子顕微鏡は正にこの点を改善した仕様となっている。破断過程の動的観察は技術的に極めて難しい実験だが、破断前後の組成分析は比較的容易である。しかし、この電子顕微鏡では容易にできる“破断前後の粒界組成の比較”や“割れた両破面の同時観察”は、粒界破壊の研究にこれまでよく用いられてきたオージェ電子分光法や 3 次元レーザーアトムプローブでは、やりたくてもできない分析である。これが本研究で期待できる成果の新奇性についての、最低保証ラインである。

・研究経過及び結果

放射線従事者登録の書類手続きが難航したため、電顕を使用できたのは 2/24~2/25 の 2 日間のみであった。他のユーザーと共に装置の使用方法についてガイダンスを受講するという制約があったため、引張りホルダを使用した本格的な実験は行わず、装置の操作方法をマスターすることを主目的として、難易度の低い試料の分析を行った（Fig. 2）。この試料の元素マッピングは、分析に特化したこの電顕では容易であったが、これとは仕様が異なる同型機種（ショットキー電界放出型電子銃、対物レンズの球面収差補正機構、直径 30 ミリの検出器）では、微細な析出物をここまで鮮明に映し出すことはできなかった。尚、このデータは本申請課題である粒界の研究テーマとは直接関係していないが、単なるテスト分析という訳ではなく、現在投稿中の論文に必要不可欠なものであるという意味で有意義な実験である（Nature Physics のレフリーからのコメントに対応するための追加データ）。この他に、これとは別の電子顕微鏡を用いて原子レベルの動的観察技術のノウハウ蓄積は着々と進めており（Fig. 3）、次年度からの本格的な実験に向けて、準備は整いつつある。

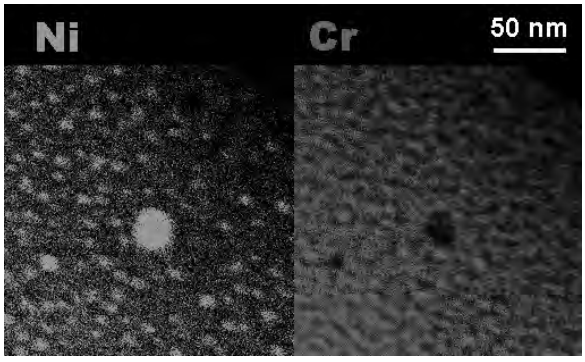



**Fig. 2 | 2 相ステンレスに析出した金属間化合物 G 相と Cr-rich α′相の EDS マップ**

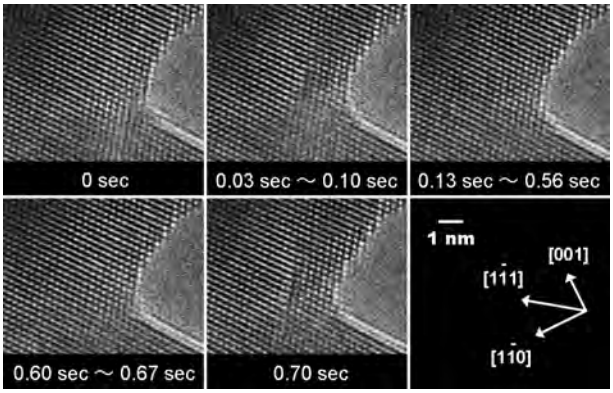



**Fig. 3 | 進展するクラックの原子レベル動的観察**

・成果報告

実験開始が 2/24 であったため、この成果報告書を執筆している時点（2/28）では、論文及び学会発表は無し。

# 26 FP-29

## D-C-N 反応性低温プラズマによる炭素堆積膜中への水素同位体吸蔵制御

金沢大学理工学域電子情報学系　上杉喜彦

### 1．はじめに

核融合装置の壁材料はプラズマとの相互作用によって装置内で再堆積層やダストを形成する。核融合燃料であり，放射性物質であるトリチウムの堆積物への取り込みは放射性物質の炉内残留を引き起こし，またダスト粒子飛散による放射性物質拡散の可能性があるため，安全面で大きな問題となっている。壁候補材の一つである炭素材料は低 Z 材で耐熱衝撃性に優れるため、今までの核融合実験装置のプラズマ対向壁として広く使用されてきたが、核融合燃料である水素同位体による損耗率が高いため多量の再堆積層およびダストが生成されること、またこれらの炭素系堆積物に多くの水素同位体が取り込まれることが問題となっている。これまで、Heliotron-DR 装置を用いた低温・低密度水素プラズマに炭素不純物としてメタン ($CH_4$) を用いた水素化炭素膜堆積実験により、水素・メタン混合プラズマにわずかな窒素導入（$Q_N/Q_H$~0.05) によって炭素膜堆積が大きく抑制されることを見いだしている。

### 2．Heliotron-DR における重水素ベンゼンを用いた炭素不純物導入

図 1 に Heliotron-DR を用いた炭素膜堆積および重水素吸蔵の実験概要図を示す。これまで炭素不純物源としてメタン ($CH_4$) を用いてきたが、今回、将来の昇温脱離分析（TDS) なども考慮して軽水素を極力含まない水素化炭素膜堆積とその抑制実験を行うために、炭素不純物として重水素化ベンゼン ($C_6D_6$) を用いた実験を行った。窒素導入に伴う原子・分子反応の解明のために、3 台の四十極質量分析器を主排気ダクトおよび加熱試料台の差動排気系に接続し排出ガス分析を行った。また、可視分光器により発光粒子分析を行った。水素化炭素膜の成長過程の観察のために加熱試料台に置かれたシリコン試料上に堆積する水素化炭素膜厚を分光エリプソメータで測定し、光学顕微鏡ならびに SEM で表面観察を行った。

図 2 にシリコン表面に堆積した水素化炭素膜堆積速度の表面温度依存性を示す。加熱試料台を試料導入用ポート内側（円形真空容器壁面より ~4 cm 外側）の陰領域に設置した場合においても、メタンと同程度の ~ 数 nm/h 程度の堆積速度を持った炭素膜堆積特性を得たが、メタンと重水素化ベンゼンで異なる表面温度依存性が見られている。この異なる炭素膜堆積特性が炭素不純物源の違いによるものか、または試料台の設置位置の違いによるものかについては、今後検討する予定である。以降、重水素化ベンゼンを用いた炭素膜堆積抑制実験は十分な炭素膜堆積が得られる $T_s$=300~320 K の温度領域で行った。

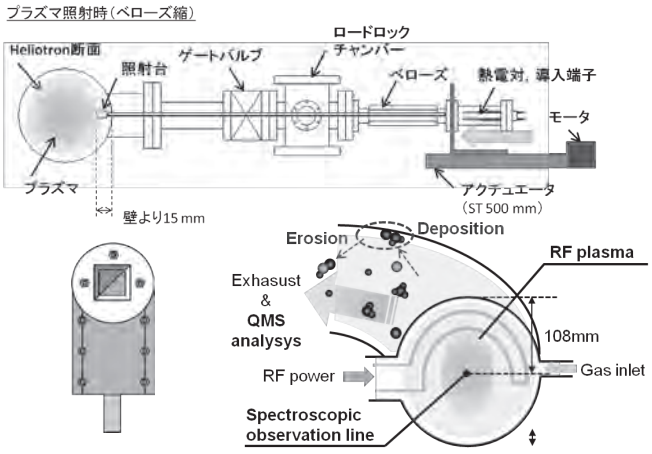



図 1 Heliotron-DR 装置 ( 断面概略図と試料台 ) と実験概要図

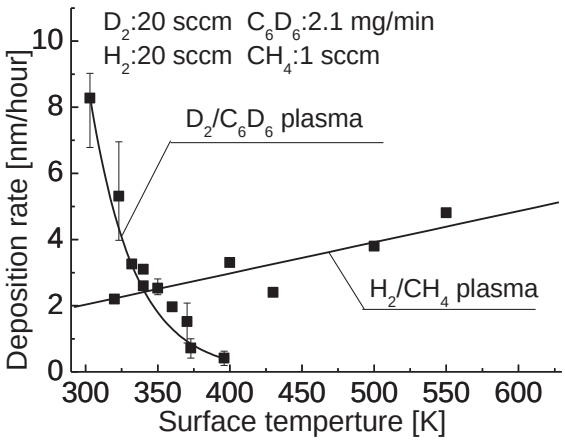



図 2　メタンまたは重水素化ベンゼン導入による水素化炭素膜堆積速度の試料表面温度依存性

## ３．窒素導入による水素化炭素膜堆積と重水素吸蔵の抑制：窒素スカベンジャー効果

図３に重水素 / 重水素化ベンゼンプラズマ中に窒素を導入したときの質量分析結果を示す。窒素導入に伴い、揮発性の $ND_3$ や CN などの N を含む粒子分圧値の大きな増加が見られる。一方、可視分光測定からは CN 分子スペクトル強度の大きな上昇が観測されている。これらの観測結果は、窒素導入により低温領域で凝集性の強い炭化水素（CxDy）から非凝集性の NDz や CN 系粒子が選択的に生成されたことによるものと考えられる（窒素スカベンジャー効果）。図４に窒素導入に伴う水素化炭素膜膜厚変化を示す。窒素導入により水素化炭素膜成長が強く抑制されている。この炭素膜成長の抑制は、炭素膜中に吸蔵されている重水素量の低減効果をもたらすことが期待される。

図５に窒素ガスをステップ的に導入した時の主要な分子性粒子のガス分圧時間変化を示す。水素化炭素膜堆積の抑制に主要な役割を果たす揮発性 CN 系粒子や重水素吸蔵を抑制することが期待される揮発性 ND 系分子の分圧上昇が見られる。また、これら揮発性ガス分圧変化の特性時間 (10~20 分 ) は、装置のガス導入 / 排気系の特性時間や炭素不純物導入時の炭化水素分圧変化の特性時間に比べてはるかに長く、導入された窒素が関与する分子反応は炭素堆積膜中への窒素原子の拡散と膜中での揮発性分子形成が強く関係していることを示唆するものと考えている。

図６に同様に窒素導入量をステップ的に変化させた時の重水素原子分圧の時間変化を示す。窒素導入量の増加につれて、重水素原子の分圧はステップ的に増加する。この分圧上昇は、ベンゼン導入に伴い重水素を取り込みながら炭素膜が形成されていた（重水素化炭素膜の形成）系に窒素が導入されることで炭素膜中への重水素吸蔵が抑制されたことを示すのもである。同様な分圧上昇が、$D_2$(m/z=4) や HD(m/z=3) にも見られており、今後、詳細な重水素吸蔵量の評価を行い、窒素導入による重水素吸蔵抑制効果を明らかにする予定である。

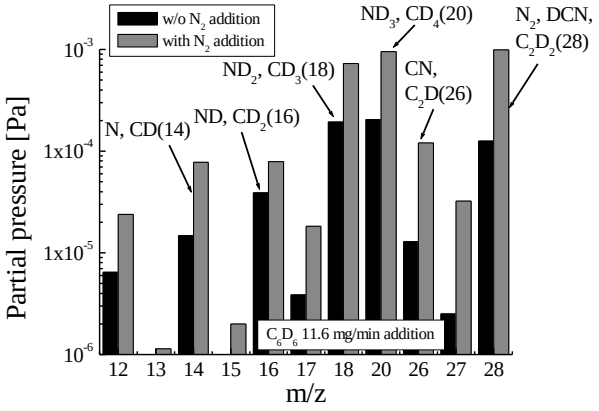



図３ 重水素 / 重水素化ベンゼンプラズマへの窒素導入有無によるガス分圧値の比較

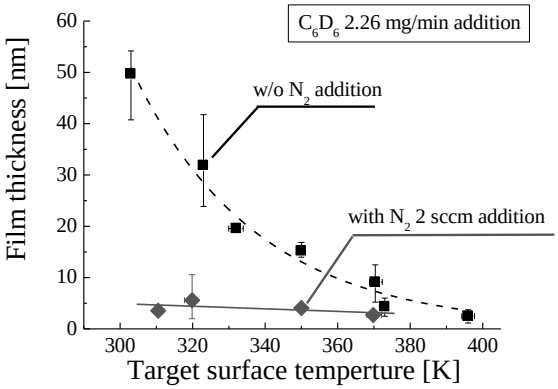



図４ 堆積膜厚の試料表面温度依存性

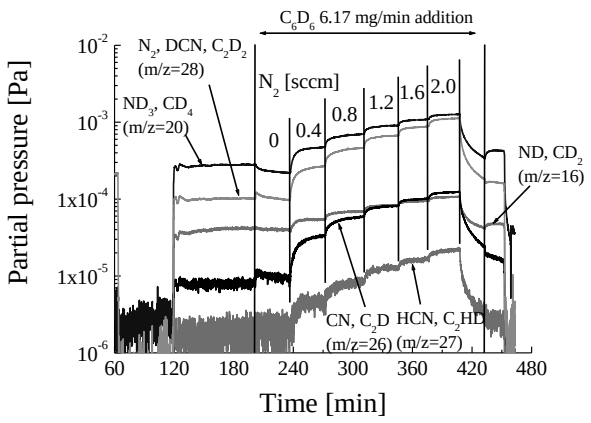



図５　重水素 / 重水素ベンゼンプラズマ中への窒素導入に伴う分子性ガス分圧の時間変化

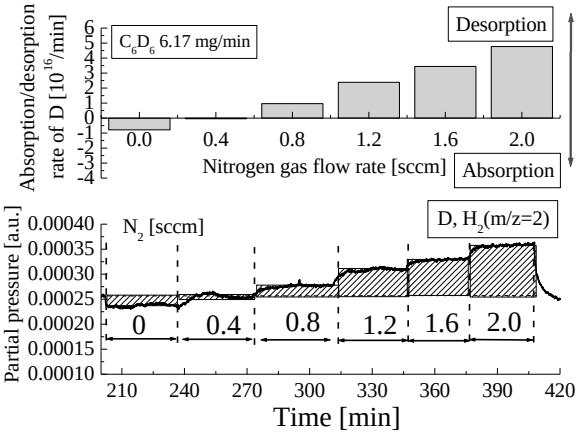



図６　重水素 / 重水素ベンゼンプラズマ中への窒素導入に伴う重水素原子分圧の時間変化

26 FP-30

# 燃料電池用水素吸収・貯蔵リチウムセラミックス材料中の水素の熱放出特性

Thermal release property of hydrogen absorbed and stored in lithium oxides ceramics for fuel cells

名城大学理工学部　土屋 文

Bun Tsuchiya

Faculty of Science and Technology, Meijo Univ.

**目的**　現在、自動車用水素燃料電池の水素供給源に求められる水素貯蔵材料の水素吸収、貯蔵および放出特性は、常温貯蔵、5 wt%以上の水素の重量貯蔵容量および150℃以下の放出温度である。本研究室では、これまで、常温および大気中において安定で水素の拡散係数の高いリチウムチタネート($Li_2TiO_3$)、リチウムジルコネート($Li_2ZrO_3$)、リチウムシリケート($Li_4SiO_4$)セラミックス材料の水素吸蔵特性を調べた結果、$Li_2ZrO_3$ および $Li_4SiO_4$ の材料において、材料の重量が室温において空気に曝すだけで時間と共に増加することを発見した。この重量の増加は、空気中の水蒸気が材料中に取り込まれ、水素として貯蔵されていることを意味しており、新規な水素燃料電池用の水素供給源として利用される可能性がある。従って、本研究の目的は、タンデム加速器を用いた反跳粒子検出(ERD)法および熱放出実験装置(TDS)を用いて、水素放出温度を決定すると共に、水素の熱放出挙動および材料中に貯蔵された水素の占有位置について明らかにすることである。

**実験方法**　寸法φ8.0x1.0 $mm^3$、2.53～3.78 $g/cm^3$ の密度、単斜晶(蛍石型構造)の $Li_2ZrO_3$ 試料を使用した。この試料を真空内で 473～573 K まで加熱して試料中の残留水素を取り除いた後、約 286～297 K の室温および約 30-55%R.H. の相対湿度の大気中に放置した。このとき、精密電子天秤を用いて、$Li_2ZrO_3$ 試料の重量を大気に曝した時間(空気暴露時間)に対して測定した。さらに、1.7 MV タンデム加速器からの 2.8 MeV $He^{2+}$イオンをプローブビームとした ERD 法により、試料中に吸収された水素(H)の濃度を測定した。捕捉 H 濃度および重量が一定になった後、これらの試料を真空内で室温から約 673～773 K まで加熱して、ERD 法および TDS 法により捕捉 H 濃度測定および放出ガス種の判別をそれぞれ行った。

**実験結果および考察**　ERD 法により得られた $Li_2ZrO_3$ 試料中の H の濃度分布を図 1(a)に示す。図 1 中の 298 K のスペクトルは試料作製後の試料中の H 濃度分布を示す。水($H_2O$)が試料作製時に混入し、格子間 H 原子、水酸基(-OH)あるいは $H_2O$ 等の形状で吸収されていると考えられる。333～423 K における ERD スペクトルは、試料を各温度で約 10 分間の等時加熱を行った後に測定された。深さに対する H 濃度は温度上昇とともにほぼ同程度で減少することがわかった。次に、各温度の ERD スペクトルの全カウント数を 298 K の ERD スペクトルの全カウント数で規格化し、加熱温度に対してプロットした(図 1(b))。試料中の捕捉 H 濃度は、約 323 K の低温から減少し始め、約 423 K で全 H 濃度の 10 %以下に達することが判明した。この結果は、$Li_2ZrO_3$ 中に捕獲された H は、各トラップサイトから脱離あるいは脱捕獲するためのエネルギーが極めて低く、また拡散係数が非常に高いことを示している。

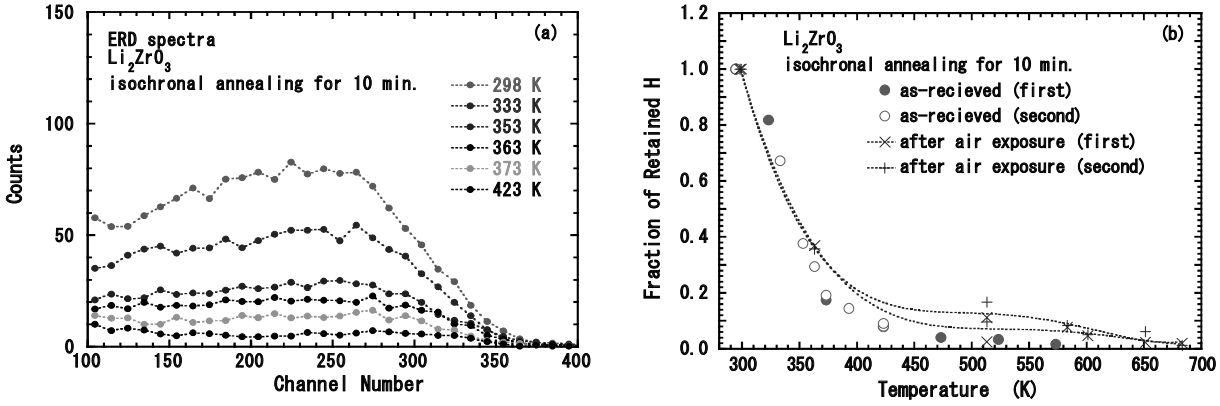



図 1　(a)室温から 423 K まで加熱された $Li_2ZrO_3$ の ERD スペクトル、(b) $Li_2ZrO_3$ 中の捕捉 H 濃度の温度依存性。

次に、真空内で残留水素を取り除いた $Li_2ZrO_3$ 試料を室温において大気中に曝した。空気暴露時間に対する試料の重量増加の割合(wt%)を図 2 に示す。試料の重量増加の割合は、どの密度に対しても急激に増加した後、ある時間で一定に達することがわかった。特にもっとも密度(2.53 g/cm$^3$)の低い試料の重量は、約 1500 hrs で約 25 wt%まで増加した。次に、1410 hrs の空気暴露時間後に得られた ERD スペクトルおよび空気暴露時間に対する ERD スペクトルの全カウント数をそれぞれ図 3(a)および(b)に示す。ERD スペクトルの横軸の Channel Number は反跳された $H^+$イオンのエネルギーであり、深さ方向の情報を与える。従って、H の濃度は、どの深さに対してもほぼ同程度増加することがわかった。また、図 2 および 3(b)を比較すると、空気暴露時間に対する試料の重量増加と捕捉 H 濃度の増加が似た傾向を示すことがわかる。従って、重量増加は大気中の水蒸気吸収が要因の一つとして考えられる。

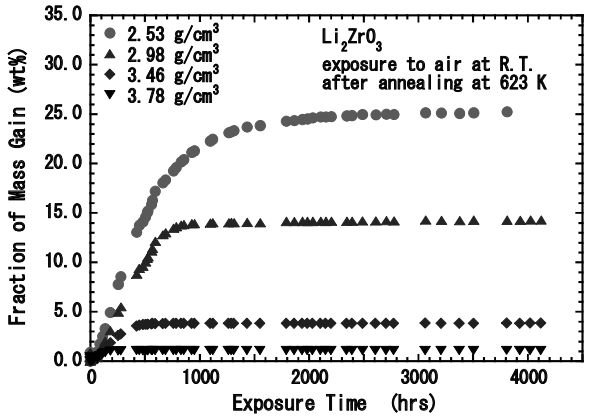



図 2　室温で大気中に曝された $Li_2ZrO_3$ の重量変化。

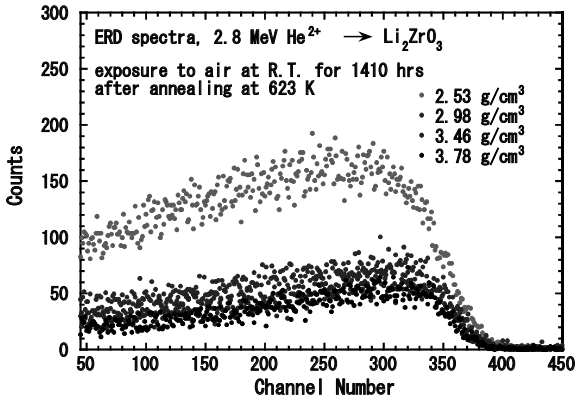
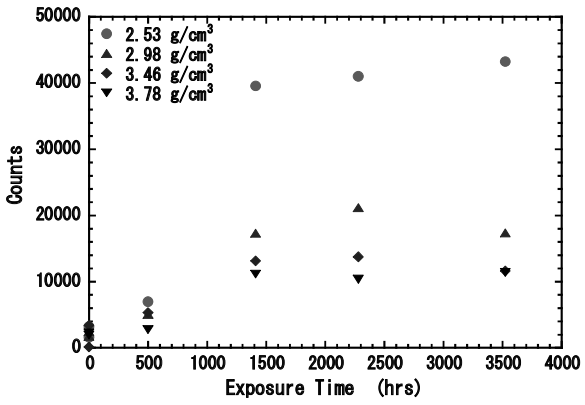



図 3　(a)室温で大気に 1410 hrs 曝された ER D スペクトル。




(b) $Li_2ZrO_3$ 中の捕捉水素濃度の空気暴露時間依存性。

次に、TDS 法を用いて、重量変化が一定になった $Li_2ZrO_3$ 試料を室温から 773 K まで 4 K/min の温度上昇速度で加熱し、試料から放出されるガス種の判別を行った。得られた TDS スペクトルを図 4 に示す。$CH_4$ および $H_2O$ が約 300 K の低温から放出し、続いて $H_2$ の放出ピークが約 427 および 603 K の加熱温度で観測された。さらに、10 min 間の等時加熱後に ERD 法によって測定された $Li_2ZrO_3$ 中の捕捉 H 濃度の変化を図 1(b)中に示す。捕捉 H 濃度は約 323～423 K および約 473～573 K の温度範囲で減少することがわかった。2 段階の H 放出は、2 種類のトラップサイトが存在することを示し、第 1 段階は Li あるいは Li 水酸化物(LiOH)の周りに吸着した $H_2O$ の脱離、第 2 段階は H 原子の酸素空孔からの脱離が律速で生じると考えられる。また、図 4 から 500 K 以上になると CO および $CO_2$ の放出も観測された。これらのガス種も $H_2O$ と同時に大気中から試料中に吸収されており、重量増加の割合を高めている要因であると考えられる。

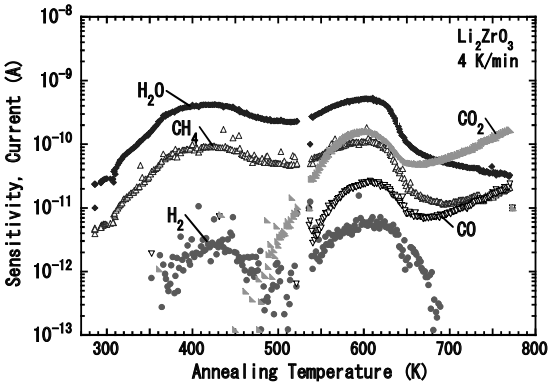



図 4　加熱された $Li_2ZrO_3$ からの放出ガス種の温度依存性。

**まとめ**　真空内で約 473～673 K まで加熱して残留 H を取り除いた $Li_2ZrO_3$ を室温で空気中に放置した。重量法および ERD 法により、2.53 g/cm$^3$ の $Li_2ZrO_3$ の重量が約 1500 hrs の空気暴露時間で約 25 wt%まで増加し、飽和捕捉 H 濃度は密度の増加と共に減少することがわかった。また、TDS 法および ERD 法により、捕捉 H は約 300 K の低温から $CH_4$ および $H_2O$ の形状で放出し、捕捉 H 濃度は約 423 K で 10 %以下まで減少することがわかった。

# 26 FP-31

研究課題名：酸化物セラミックス中の水素同位体の溶解、拡散、放出挙動に関する研究

九州大学大学院総合理工学研究院
エネルギー理工学部門
橋爪　健一

## １．目的

核融合炉システムにおいて燃料であるトリチウムは、核融合炉構造材あるいは配管材として使われる金属、合金に溶解、透過し易く、結果として、その一部が炉内へ蓄積したり、あるいは、炉外へ漏洩して安全上問題となる可能性がある。このような、金属、合金へのトリチウム溶解を防ぐために、各種の酸化物材料が漏洩防止のコーティング材としてその有効性が研究されている。コーティング材として代表的な酸化物材料に、$Al_2O_3$、$Er_2O_3$、$ZrO_2$、$SiO_2$（石英ガラス）などがある。ただ、これらの材料中のトリチウムを含む水素同位体挙動は、元々、溶解度が低く、また、拡散係数も小さいと理解されており、その実験手法も限られ、溶解度、拡散係数に関するデータも核融合炉用コーティング材として評価するには十分ではない状況にある。現実的には、コーティング材として使用する場合には、その酸化物材料のバルクとしての性質とともに、粒界や気孔などの欠陥が、コーティングの性能を左右する可能性も否定できないが、酸化物材料の本来の性能を知り、改良を可能とすることがコーティング材の高性能化には欠かせない。本研究では、今年度、$ZrO_2$ に注目し、重水素（$D_2O$）あるいは重水（$D_2$）を用い水素同位体の溶解・放出挙動を明らかにすることを目的とした。

具体的には、熱的、化学的に安定な立方晶イットリア安定化ジルコニア単結晶（YSZ）を用い、水素同位体の溶解、拡散、放出挙動を調べる。これらの試料に高温でのガス吸収法にて重水素を均一に溶解させた試料を準備し、応用力学研究所の昇温脱離ガス分析装置(TDS)を用いて、真空雰囲気で昇温し、水素同位体放出挙動を観測する。

## ２．実験方法

表面を鏡面研磨した厚さ 0.5 mm の立方晶 YSZ(13%$Y_2O_3$ 添加 $ZrO_2$(100)、Dalian Keri Opt. Tech.)板材を、0.5 x 10 x 0.5 $mm^3$ あるいは 0.2 x 10 x 0.5$mm^3$ に加工して試料とした。試料を $D_2$ ガス雰囲気で曝露し（温度：873 K～1373 K、$D_2$ 圧力：～450 Torr)、重水素を溶解させた後、応用力学研究所の昇温脱離ガス分析装置（ULVAC YLK-2S）を用いて、試料からの重水素を含むガス（$D_2$、HD、$D_2O$、HDO）の TDS スペクトル（昇温速度 1 K/s、～1400 K）を測定した。なお、放出ガスの定量には、標準 He リークを用いた。

## ３．結果と考察

1173 K、1273 K および 1373 K で重水素溶解した YSZ の $D_2$ の TDS スペクトルを図１に示す。放出はほぼ単独のピークとして現れ、その温度は 1200～1300K であった。$D_2$ 溶解温度の影響は、放出量の差として顕著に見られ、溶解温度が高いほど放出量が多いことが分かった。なお、1173 K よりも低い温度での $D_2$ 曝露試料では、検出された $D_2$ 量は極僅かであり TDS の定量限界以下であった。この $D_2$ とその他のガス種（HD、$D_2O$、HDO）の放出量の結果をまとめて図２に示す。重水素は水素ガスあるいは水蒸気として放出されており、その比率は溶解条件あるいは水素の放出量によって異なることが分かった。1373 K では、水素ガスが主であるのに対し、それ以下の温度では、水蒸気が主となっている。

これらの放出された重水素の総量を算出し、この値をYSZ試料に溶解した重水素全量と見なし、水素の溶解度とした。水素溶解度のアレニウスプロットを、ジルコニアへの水素溶解度文献値とともに図３に示す。YSZ への水素溶解量は、溶解温度とともに上昇する、吸熱型の温度依存性を示し、溶解熱の値は+0.9 eV であった。この結果は、より低温域で立方晶YSZを使って測定されたトリチウム実験の結果と一致していた。ただ、水素溶解度の温度依存性は、この図に見られるように、ジルコニアの結晶系、溶解温度あるいは水素源の化学種（水素ガス、水蒸気）によって変化し複雑である。

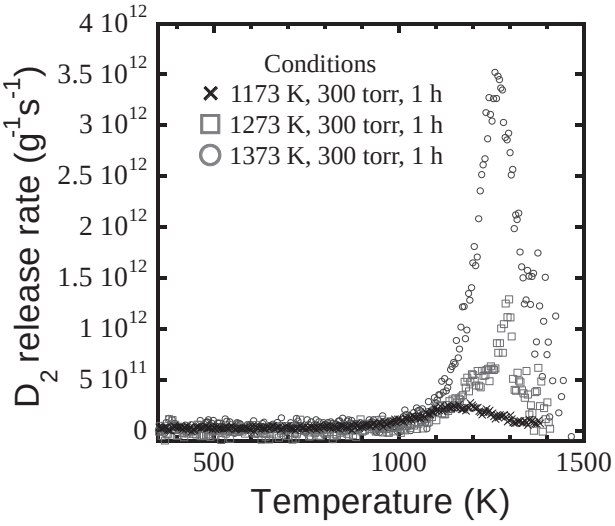



図１　YSZ からの重水放出スペクトル
重水曝露温度：1173, 1273, 1273K

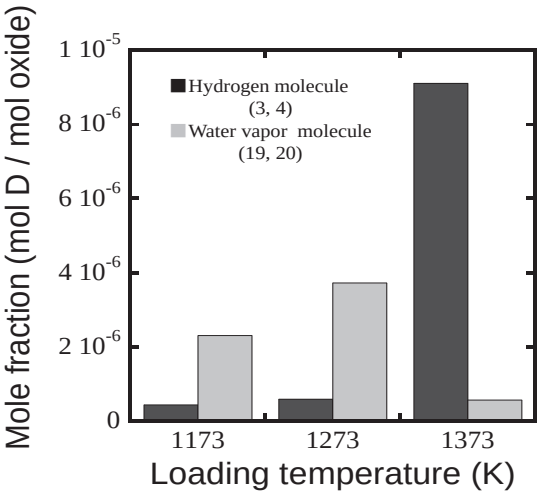



図２　TDS 時の YSZ からの放出ガス種

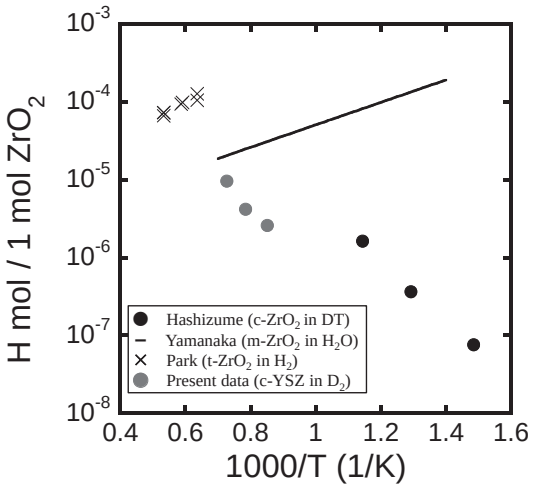



図３　ジルコニア中の水素溶解量

４．まとめ

単結晶 YSZ 中の高温での重水素溶解量を TDS 実験により測定した。その結果、溶解度は溶解温度とともに増大し、吸熱型の溶解挙動を示した。この温度依存性は、過去の低温で測定された立方晶 YSZ の場合と一致しており、溶解熱の値も近いものであった。今後、より高性能の核融合炉用コーティング材料の探索のために、TDS 等を利用した共同利用、共同研究を進めたい。

５．研究組織

九大総理工：橋爪健一、大塚哲平　　大学院生：松田浩輝、山下健太、山口諒真
九大応力研：渡辺英雄

# 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
## ～電子および重イオンの重畳照射に伴う微細組織変化～

九大工　桑原　健人(院), 高木　聖也, 安田　和弘, 山本　知一, 吉岡　聰, 松村　晶

### 1. 目的

蛍石型酸化物は耐照射損傷性に優れるため、長寿命核種の核変換処理材料等として期待されている。蛍石型酸化物中では、陽イオンと陰イオンの質量が大きく異なり、かつはじき出しエネルギーは陽イオンのほうが大きい。このため、蛍石型酸化物中の陰イオン点欠陥の形成速度は、陽イオンと比べて著しく大きくなる。陽および陰イオン点欠陥の形成速度比は、一次はじき出し原子のエネルギーに依存するため、放射線の種類やエネルギーによって変化する。このため、一次はじき出し原子のエネルギースペクトルが広い原子炉環境において、陽陰イオン点欠陥の形成速度比が照射欠陥形成・成長過程に及ぼす効果を明らかにすることが重要である。本研究では、蛍石構造酸化物である $CeO_2$ を対象として透過型電子顕微鏡(TEM)を用いた電子照射およびイオン加速器を用いた重イオン照射を行っている。電子照射と重イオン照射を組み合わせ、酸素イオン副格子のはじき出し損傷に由来する欠陥が、両イオン副格子のはじき出し損傷を誘起する重イオン照射に及ぼす影響に調べてきた。本年度は、蛍石型酸化物である $CeO_2$ を対象とし、陽および陰イオンのはじき出し損傷比や電子励起効果などが異なる条件下での照射欠陥形成・成長過程を明らかにすることを目的とした。そのため、透過型電子顕微鏡（TEM）を用いて幅広いエネルギー範囲の電子を照射しながら照射欠陥の形成・成長挙動を「その場」観察した。さらに、形成された転位ループの熱的安定性についても調べた。

### 2. 実験方法

$CeO_2$ 粉末（レアメタリック社製、純度 99.99 %）を一軸加圧および静水圧加圧し、ペレット状に成型した。これを 1873 K の大気中にて、12 時間焼結した。焼結体を直径 3 mm の円板状に打抜き、機械研磨を施した後、Ar イオン研磨法により TEM 観察用薄膜試料を作製した。この試料を TEM 内に挿入し、電子照射を行いながら照射欠陥の形成・成長挙動を「その場」観察した。九州大学超顕微解析研究センターおよび大阪大学超高圧電子顕微鏡センターの TEM を用いて、80－3000 keV の幅広いエネルギーの電子を照射した。照射温度は、1250 keV 以下の場合には室温とし、1500 および 3000 keV の場合には、室温から 1073 K の範囲とした。照射電子線束密度は $1.0\times10^{23}$ － $3.1\times10^{24}$ $e^-/m^2s$、最大照射時間は 30 min とした。これまでに報告されている O および Ce イオンのはじき出しエネルギーを考慮すると、1250 keV 以下の電子照射では O イオンにのみ選択的にはじき出され、1300 keV 以上の電子照射では O および Ce の両イオンにはじき出し損傷が誘起される。さらに、1250 keV 以下の電子照射により形成された転位ループの熱的安定性を電子を照射しない状態にて調べた。

### 3. 結果および考察

図 1 は 200 keV 電子照射により形成された転位ループの成長挙動の一例を示す。転位ループは強い歪みコントラストを伴いながら約 20 nm の大きさまで成長している。1250 keV 以下の電子照射では、O イオンにのみはじき出し損傷が誘起されるため、この転位ループは Yasunaga ら[(1)]によって報告されている {111}面を晶癖面とする O イオンによって構成される格子間型転位ループであると考えられる。すなわち、1250 keV 以下の電子照射下において形成される酸素イオン格子間原子が集合することにより形成される転位ループ[(2,3)]であると考えられる。

0 イオン格子間型転位ループについて、以下の方法により成長挙動を解析した。転位ループは、直径 $D$ が照射時間 $t$ のべき乗 $t^{\delta}$に比例して成長すると仮定し、個々の転位ループ直径の時間変化から$\delta$値を評価した。この結果、$\delta$値は電子エネルギーに依存して変化しており、500 keV 以上のエネルギーでは約 0.3 の一定値を示しているが、それ以下のエネルギーでは$\delta$値は電子エネルギーの低下に伴って増加し、140 keV 以下で再び減少することがわかった[(4)]。純金属を用いた過去の研究により、$\delta$値は空孔の移動度が十分に高い場合には$\delta \cong 1$となり、空孔の移動度が低い場合には$\delta \cong 1/3$となることが報告されている[(5)]。1250 keV 以下の電子照射で形成される転位ループは、0 イオンのみによって構成されると考えられるため、電子エネルギーに依存する $\delta$ 値の変化は、0 空孔の移動度が電子エネルギーに依存して変化していることを示唆している。$\alpha$-$Al_2O_3$ などの酸化物では電子励起効果によって点欠陥の荷電状態が変化し、それに伴って点欠陥の拡散が誘起されることが報告されている。すなわち、$\delta$値が電子エネルギーに依存する結果は、140－500 keV のエネルギー域において、電子励起によって 0 空孔の移動度が増大していることを示唆している。

図 2 は、200 keV の電子照射で形成された転位ループを室温で保持した際の時間変化を示している。O イオン転位ループは 283 - 333 K の温度範囲に保持すると収縮・消滅することがわかった。この結果は、O イオン転位ループがこの温度域で熱的に不安定であることを示している。収縮速度は温度と共に増大した。収縮速度のアレニウスプロットにおける直線近似式から、収縮挙動を律速する点欠陥の移動活性化エネルギーを算出すると、0.95±0.06 eV と評価できた。図 3 に示す転位ループは O イオン格子間原子ループと考えられるため、その収縮は O 空孔の移動および再結合によるものと考えられる。しかしながら、評価した O 空孔の移動活性化エネルギーは、報告値の 0.46 - 0.58 eV[(3)]とは異なっている。転位ループ収縮挙動の機構については、更なる検討が必要である。


(1) K. Yasunaga, K. Yasuda, S. Matsumura, T. Sonoda, *Nucl. Instrum. Meth. B* 266 (2008) 2877.
(2) K. Shiiyama, T. Yamamoto, T. Takahashi, A. Guglielmetti, A. Chartier, K. Yasuda, S. Matsumura, K. Yasunaga, C. Meis, *Nucl. Instrum. Meth. B* 268 (2010) 2980.
(3) S.Takaki, T. Yamamoto, M. Kutsuwada, K.Yasuda, S. Matsumura, *Mater. Res. Soc. Symp. Proc. 'Advances in Materials for Nuclear Energy'* 1514 (2013) 93.
(4) 桑原　健人　九州大学修士論文(2015).
(5) M. Kiritani et al.: J. Phys. Soc. Japan **35** (1973) 6.

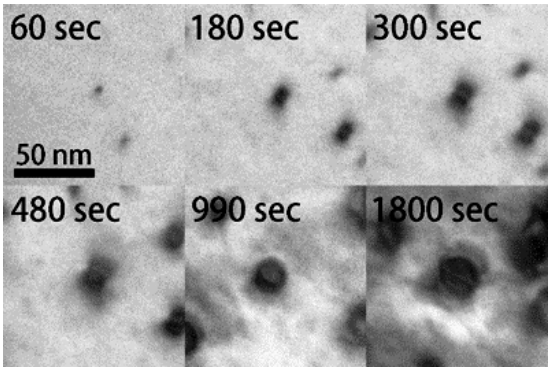




図 1. 室温下 200 keV の電子照射で形成された転位ループの成長挙動。電子線束密度 $1.61 \times 10^{23}$ e-/m$^2$s。

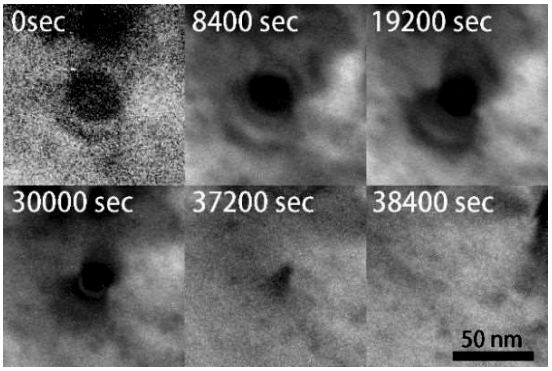



図 2. 200 keV 電子照射で形成された転位ループを室温で保持した際の収縮挙動。数字は保持時間(秒)。

# 26 FP-S1

## 各種磁場配位での周辺揺動研究

広島大学大学院工学研究科　西野信博

目的と特徴

核融合プラズマを実現する上で重要なキーとして，今なお閉じ込め制御，定常化が挙げられる。特に，閉じ込め制御に関しては，周辺プラズマにおける乱流状態を抑制・制御する必要があり，そのための実験や理論的研究、あるいは，シミュレーションが盛んに行われている。既に、多種の磁場配位で突発的な粒子・エネルギーの掃出しを伴う乱流現象が観測されており、この乱流(Blob と称される)はプラズマと磁場との相互作用において一般的な物理現象と認識されている。

日本における核融合研究では、全国に種々の磁場配位の装置が稼働している。代表的な直線磁場配位は筑波大学の GAMMA 10 があり，ヘリカル型配位では LHD や Heliotron J，また，ＳＴ，あるいは，トカマク型配位では，九州大学の QUEST がある。このように，現時点で稼働している実験装置の磁場配位の種類は世界一といってよい。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。

最終年度の本年は，今までの計測結果のまとめ，また，最新の乱流の計測結果の紹介，今後の乱流計測の計画などを参加者で議論し、乱流現象に対する理解を深めることにある。主催者の個人的な偏見ではあるが、この３年の間に装置間での乱流研究の知見の交換ができ、磁場配位との関連性が見え始めてきた感があり、本研究会を開催できて本当によかったと思っている。

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（３年分）は，応用力学研究所の HP （https://storage.iii.kyushu-u.ac.jp/public/9WVQAAhIXQ4ANkABupJLJpmPlqPTpNUeHiaozvj7SfV9）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，西野（広大），発表資料の各担当者，もしくは，所内世話人図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 27 年 2 月 13 日（金）

会場：九州大学応用力学研究所 QUEST 棟２F 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：図子秀樹

トピックス：各装置における周辺乱流研究の紹介と今後の計画など

プログラム

13：00－13：15　Opening address by Nobuhiro Nishino (Hiroshima Univ.)

Chair: Nobuhiro Nishino (Hiroshima Univ.)

13：15－14：15　ヘリカル・直線型装置における静電揺動解析 by Hirohiko Tanaka (NIFS)

14:15－14:20 (Coffee Break)
14:20－15:20 ヘリオトロンJ装置における揺動研究 by Shinsuke Ohshima（Kyoto University）
15:20－15:25 (Coffee Break)
15：25－15：55 直線円筒形プラズマのためのトモグラフィアルゴリズムの開発 (Development of Tomography Algorithms for a Linear Cylindrical Plasma) by 大野 翔（Kyushu University）
15：55－16：25 直線プラズマ装置 PANTA におけるトモグラフィーシステムを用いたプラズマ揺動とコヒーレンスモード構造解析 by 高橋 宏輔 (Kyushu University)
15：25－16：55 多チャンネル多波長分光による直線プラズマのトモグラフィーと乱流特性解析 (Tomography and Turbulence Characterization Observed with Multi-channel and Multi-wavelength Spectroscopic System in Linear Cylindrical Plasma) by 武次 克哉（Kyushu University）
16：55－17：00 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）
大島 慎介 （京大・エネルギー理工学研究所・助教）
田中 宏彦 （核融合科学研究所・助教）
恩地 拓己（九大応用力学研究所・研究員）
大野 翔 （九大応用力学研究所・修士)
高橋 宏輔 （九大応用力学研究所・修士)
武次 克哉 （九大応用力学研究所・修士)

発表概要は、以下のとおり。

１．H. Tanaka
LHD における研究成果と進捗状況について
Plasma Blob 輸送、非接触プラズマ中の間欠的輸送に関しての発表
GAMMA 10 における研究成果と進捗状況
コアーエッジ揺動相関に関する発表

２．S. Ohshima
Heliotron Jにおける長距離相関に関する研究発表
瞬時位相差を導入した信号解析に関する発表

３．S. Ohno
直線装置 PANTA プラズマを対象としたトモグラフィー解析の開発に関する発表

４．H. Takahashi
直線装置 PANTA プラズマの揺動解析（主に、スペクトル解析、モード解析）に関する発表

５．K. Taketsugi
直線装置 PANTA プラズマの ArI, ArII の発光強度分布と揺動スペクトルに関する発表

装置としては、直線装置 GAMMA 10 と PANTA、環状装置 LHD, Heliotron J の発表があった。最後に、３年間の間いろいろご協力いただいた応用力学研究所, 特に, QUEST 関係者に深く感謝いたします。

共同利用研究集会

# 第 12 回トロイダルプラズマ統合コード研究会

## 12th Burning Plasma Simulation Initiative (BPSI) Meeting

研究代表者　京都大学　福山淳
所内世話人　糟谷直宏

### １．研究集会の開催目的

応用力学研究所においては、これまで京都大学との共同研究により核燃焼プラズマ統合コード構想を発足させ、活動を行ってきた（プロジェクトの詳細は http://bpsi.nucleng.kyoto-u.ac.jp/BPSI/）。このプロジェクトは、科研費「核燃焼プラズマ統合コードによる構造形成と複合ダイナミクスの解析」(2004~2006)、「統合コードによる ITER プラズマのマルチスケール物理に関する総合的研究」(2007~2010)、「トロイダルプラズマの運動論的統合シミュレーションコードの開発」(2008~2012)等によって部分的に支援されてきた。各年度の活動状況および次年度の活動計画を含めて成果報告会を毎年開催している。今回で第 12 回目となるが、そのうち、第 2 回～第 8 回と前回第 11 回は応用力学研究所の共同研究集会として開催してきた実績がある。前回よりトロイダルプラズマに対象を拡大し、炉心プラズマと周辺プラズマ、MHD 現象と輸送現象、高エネルギー粒子と乱流輸送、加熱・電流駆動と長時間運転等の複合現象の統合モデリングおよびそのシミュレーションについて、包括的なアプローチとして議論しようとするものである。

### ２．開催日時

開催日程： 2014 年 12 月 11 日（木）－ 12 日（金）
開催場所： 九州大学応用力学研究所 2 階大会議室
講演数：23 件、参加者数：29 名

### ３．研究集会の内容

トロイダルプラズマにおける複合現象の統合モデリングおよびそのシミュレーションの進展について議論するため研究集会を 2 日間にわたって開催した。講演 23 件を内容別に分類するとトカマク統合シミュレーション 8 件、ヘリカル 5 件（うち統合シミュレーション 3 件、乱流 2 件）、SOL/ダイバータ 4 件、基礎 6 件であった。どれも質の高い研究成果報告であった。今回は SOL/ダイバータ関連のセッションを構成することができた。また、高周波物理、運動論効果、材料特性などプラズマ複合現象のシミュレーションの基盤となる基礎研究の発表も数多く、幅広い研究内容を含む研究会とすることができた。本年も昨年に引き続き若手研究者による講演が 10 件以上あり、当該分野の若手育成も進んでいることを印象付けた。以下に講演内容を抜粋して説明する。

研究会の冒頭に SOL/ダイバータセッションを構成した。滝塚より SOL プラズマの輸送に重要な中性粒子拡散係数に関する考察がなされた。空間領域からの損失を表す成分が拡散係数を小さくし、流体モデルと運動論モデルの差を埋め得ることが報告された。河村よ

り LHD 周辺プラズマシミュレーションについてダイバータ構造による輸送の違いが報告された。本間より新古典効果を含むモデリングと粒子シミュレーション計算がなされ、ピンチ項と温度遮蔽効果項の影響について報告された。

矢木からはプラズマ崩壊現象のシミュレーションについてレビュー講演がなされた。逃走電子の振る舞いを理解することが重要で、その生成機構、MHD 不安定性との結合による再分配、持続機構と制御、磁場摂動による逃走電子の損失について説明があった、また奴賀からは電子分布関数の hot tail による逃走電子生成について報告された。林からは JT60-SA の運転シナリオについて、統合コードを用いた予測の進展が報告された。藤田からは統合コード TOTAL へのピンチモデルと高エネルギー粒子効果の導入により不純物輸送と sawtooth 制御についてそれぞれ議論がなされた。本多からは統合コード TOPICS に新古典トロイダル粘性を計算するドリフト運動論コードを組み合わせてトロイダル回転を評価する取り組みに境界モデルを導入した進展について報告された。糟谷からはヘリカルコアプラズマの流体モデルを用いた乱流シミュレーションで、熱流束 - 圧力勾配関係のヒステリシスとそこで働く揺動がもたらす輸送伝播機構が報告された。河野からはアンテナとプラズマの相互作用による RF シースの形成が報告された。福山からは TASK コードの進展について波動解析を中心に報告された。

輸送をモデル化しコードに取り入れることで、少ない計算量で実験を再現する取り組みが数多くなされている。登田はジャイロ運動論コード GKV-X によるイオン温度勾配不安定性計算結果をモデル化し、LHD の輸送解析に取り入れた。横山は LHD 実験解析を TASK3D-a コードを用いることにより効率化し、データベース作成および輸送スケーリング導出を行った。LHD については村上、山口よりも NBI 加熱プラズマの解析結果が報告された。

基礎研究も進展をしている。大澤からは壁材料の水素吸蔵についての第一原理シミュレーション結果が報告された。Lesur からは運動論的非線形性と流体的非線形性を組み合わせた高エネルギー粒子駆動不安定性解析から、線形安定な領域での不安定性励起機構について議論がなされた。小菅、佐々木、服部からは基礎実験装置においても多様な乱流構造が形成され、核融合プラズマの構造形成と関連付けた研究が行えることが示された。

来年度も第 13 回研究会を九州大学で開催するべく応用力学研究所共同研究に応募すること、世代交代を促進していくことを決定し、閉会した。

## ４．研究集会プログラム

(18 min talk+7 min discuss or 15min talk+5min discuss)

**12 月 11 日(木)**

9:00 – 9:10 はじめに 福山 (京大)

(座長：矢木)

9:10 – 9:35 講演 1-1 滝塚 (阪大)

On the Fluid Modeling of Neutral Particle Transport in a SOL Plasma

9:35 – 10:00 講演 1-2 河村 (核融合研)

Transport Modeling of Peripheral Plasma in the Open/Closed LHD Divertor Configuraionts

10:00 – 10:25 講演 1-3 本間 (慶大)

Kinetic Modeling of Classical and Neo-Classical Transport for High-Z impurities in Fusion

SOL/Divertor Plasmas using Binary Collision Method

10:25 – 10:45　講演 1-4　東郷 (東大)
Simulation Study of SOL-Divertor Plasmas Using a Virtual Divertor Model

10:45 – 11:00　休憩

(座長：河村)

11:00 – 11:25　講演 1-5　登田 (核融合研)
How to Apply a Turbulent Transport Model Based on a Gyrokinetic Simulation for Helical Plasmas

11:25 – 11:50　講演 1-6　村上 (京大)
Integrated Transport Simulation of High Ti LHD Plasmas by TASK3D

11:50 – 12:50　昼休み

(座長：福山)

12:50 – 13:15　講演 2-1　藤間 (原子力機構)
Integrated Simulation with the Fast Ion Fokker-Planck Modeling Consistent with the Evolving Equilibrium in Tokamaks

13:15 – 13:40　講演 2-2　奴賀 (原子力機構)
Fokker-Planck Simulation of the Runaway Electron Generation in Tokamak Disruption

13:40 – 14:05　講演 2-3　Lesur (九大)
Hybrid, Reduced Modeling of Coupled Energetic-Particle Modes

14:05 – 14:30　講演 2-4　佐々木 (九大)
Formation Mechanism of Steep Wave Front in Magnetized Plasmas

14:30 – 14:45　休憩

(座長：村上)

14:45 – 15:10　講演 2-5　林 (原子力機構)
Integrated Modeling of JT-60SA Plasma Operation Scenarios with Model Validation and Verification

15:10 – 15:35　講演 2-6　糟谷 (九大)
Simulation Study of Hysteresis in the Flux-Gradient Relation Responding to a Source Modulation

15:35 – 16:00　講演 2-7　河野 (九工大)
Radio-Frequency Sheath-Plasma Interactions in a Semi-Realistic Tokamak Model

16:00 – 16:20　講演 2-8　山口 (京大)
NBI Heating Analysis in Multi-Ion Species Plasma in LHD

16:20 – 16:35　休憩

(座長：登田)

16:35 – 17:00　講演 2-9　瀬戸 (原子力機構)
Development of L-H Transition Simulation Framework with BOUT++ Code

17:00 – 17:25　講演 2-10　大澤 (九大)
Isotope Effect of Hydrogen in Tungsten

17:25 – 17:45　講演 2-11　服部 (九大)
Analysis of Ion-Temperature-Gradient Instabilities by Using a Gyro-Fluid Model in Cylindrical Plasmas

17:45　散会

19:30 – 22:00　懇親会

**12 月 12 日(金)**

9:00 – 9:05　事務連絡

(座長：糟谷)
9:05 – 9:30 講演 3-1 藤田 (名大)
Simulation on Tungsten Transport and Sawtooth Control in Tokamak Plasmas with TOTAL Code
9:30 – 9:55 講演 3-2 本多 (原子力機構)
Toroidal Rotation Modeling with the 3D Non-Local Drift-Kinetic Code and Boundary Models for JT-60U Analyses and Predictive Simulations
9:55 – 10:20 講演 3-3 小菅 (九大)
Density Peaking by Parallel Flow Shear Driven Instability
10:20 – 10:35 休憩
(座長：藤田)
10:35 – 11:00 講演 3-5 矢木 (原子力機構)
Progress on Disruption Research by Integrated Simulation
11:00 – 11:25 講演 3-6 福山 (京大)
Progress of Integrated Modeling Code TASK
11:25 – 11:50 講演 3-7 横山 (核融合研)
Statistical Approach for Predicting Energy Transport in LHD Plasmas Based on the TASK3D-a Analyses Database
11:50 – 12:00 まとめ 矢木
12:00 – 13:00 昼休み
13:00 – 17:00 核融合エネルギーフォーラムサブクラスター会合
17:00 散会

## ５．参加者リスト

| 氏名 | 所属 | 氏名 | 所属 |
|---|---|---|---|
| 鈴木隆 | 原子力機構 | 東郷訓 | 東大新領域 |
| 瀬戸春樹 | 原子力機構 | 本間裕貴 | 慶大理工 |
| 藤間光徳 | 原子力機構 | 藤田隆明 | 名古屋大学 |
| 奴賀秀男 | 原子力機構 | 稲垣滋 | 九大応力研 |
| 林伸彦 | 原子力機構 | 大澤一人 | 九大応力研 |
| 本多充 | 原子力機構 | 糟谷直宏 | 九大応力研 |
| 矢木雅敏 | 原子力機構 | 小菅佑輔 | 九大高等研 |
| 河村学思 | 核融合研 | 佐々木真 | 九大応力研 |
| 登田慎一郎 | 核融合研 | 花田和明 | 九大応力研 |
| 横山雅之 | 核融合研 | Maxime Lesur | 九大応力研 |
| 福山　淳 | 京大工 | 河津賢太朗 | 九大総理工 |
| 村上定義 | 京大工 | 仙頭寛輝 | 九大総理工 |
| 山口裕之 | 京大工 | 服部元隆 | 九大総理工 |
| 河野晴彦 | 九州工業大学 | 福永航平 | 九大総理工 |
| 滝塚知典 | 阪大工 | | |

# 26 FP-S3

## 第 4 回アジア輸送ワーキンググループ国際会議

応用力学研究所　稲垣　滋

目的と背景

日本、中国、韓国の参加国を中心にプラズマ乱流及び乱流輸送に関する国際的な研究グループが形成され、年に一度一同に会し、直接議論する場をもうけている。本議論を契機にその後大きく進展した研究が多く、近年の乱流物理の進展に大きく寄与している。一例としてリミットサイクル振動現象の理解が挙げられる。

このような活動において、応用力学研究所を中心とした研究グループの存在感は極めて高く、2014 年度の会議は九州大学筑紫キャンパスで行われる事となった。

本研究集会の目的は、この国際会議を共催し、かつ、応用力学研究所の共同研究の優れた成果を多く発表する事で応用力学研究所のリーダシップが一層強化され、アジア及び世界でプラズマ乱流研究を先導する事を目的とする。

研究集会の開催

開催日時：2014.06.10-2014.06.13

開催場所: 九州大学　筑紫キャンパス　C-Cube 1F 筑紫ホール

現地実行委員長: 稲垣　滋

URL: http://aptwg2014.nifs.ac.jp

予算の執行

フランスから招待講演者 1 名の招聘(X. L. Zou)旅費に執行した。

研究集会のまとめ

本国際会議は

1) 招待講演、プレナリー講演

“What can we learn from basic experiment?”, Fujisawa (RIAM, Kyushu)

“What determines the SOL layer width?”, L. Wang (ASIPP)

“Particle transport and fueling effect on ELMs”, X. L. Zou (CEA)

2) テーマグループ講演

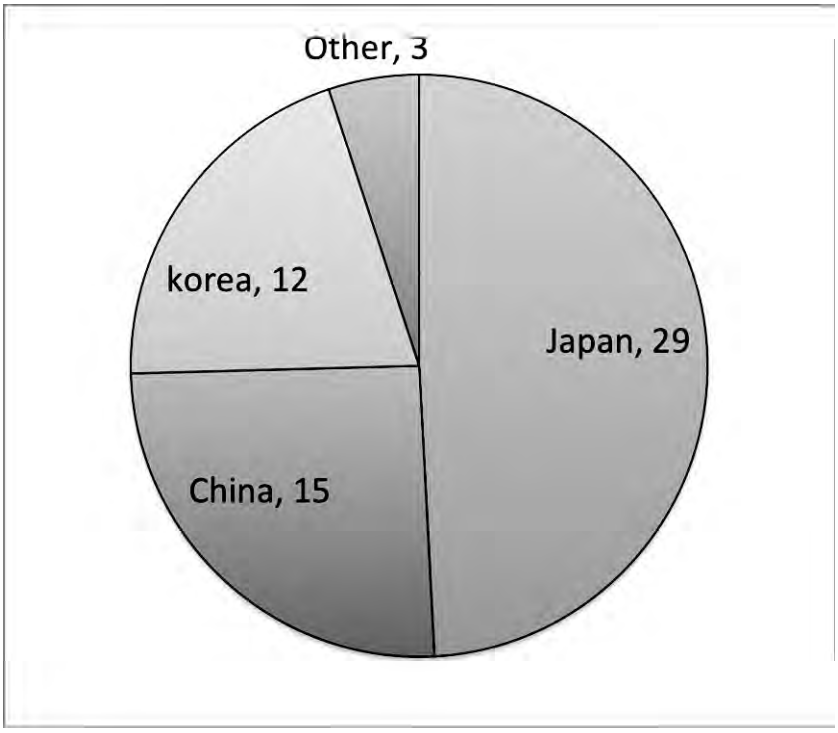
A. Turbulence suppression and transport barrier formation

Effect of magnetic topology on MHD activity and transport

B. Non-diffusive contribution of momentum and particle transport
C. Non-local transport and turbulence spreading and coupling
D. Energetic particles and instability
3）ポスターセッション
4）若手研究者フォーラム
5）サマリー
の形式で行われる。

会議の summary は以下に公開されているので詳細はこちらを参照されたし。
K. Ida, J. M. Kwon, M. Leconte, W. H. Ko, S. Inagaki, Y. Todo, Y. Kosuga
"The 4th Asia-Pacific Transport Working Group (APTWG) Meeting"
Nuclear Fusion (2015) vol.55 017001

今回は初めてPoster Prizeが設けられ、日中韓核国2名の選考委員による投票により、
Ms. Dongmei Fan
Dalian University of Technology, China
が受賞した。




Total 59