

平成18年度

核融合プラズマ分野 共同研究成果報告

核燃焼プラズマ統合コード計画

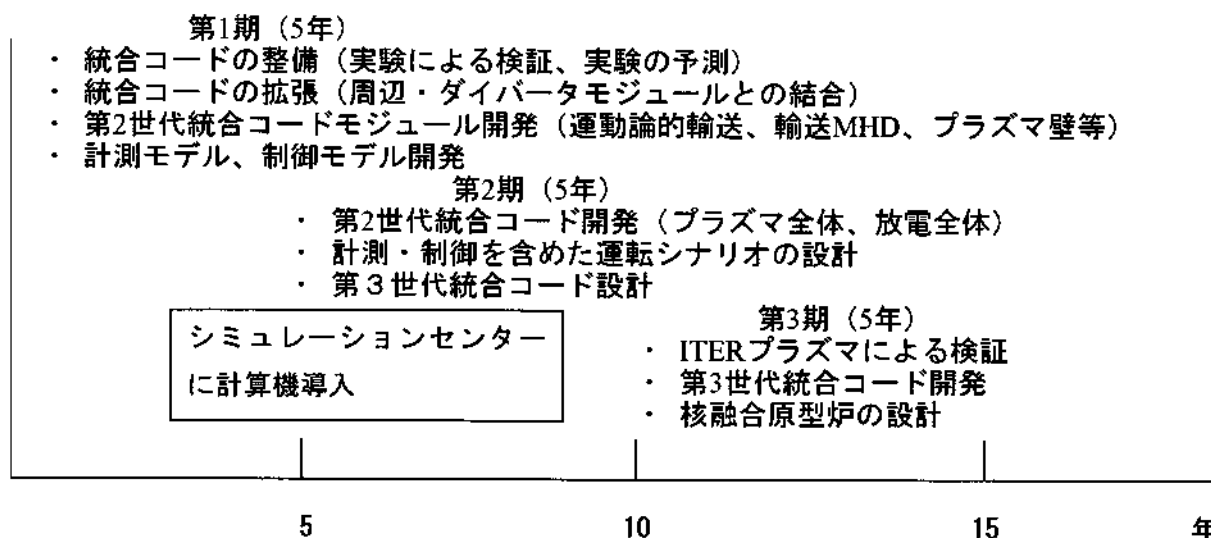
九州大学応用力学研究所

矢木雅敏

はじめに

2006 年、ITER(International Thermonuclear Experimental Reactor)協定に関する署名が 7 極（日、欧、露、中、韓、印）間で、また BA(Broader Approach) 協定に関する署名が日・欧間で行われ、核融合研究はまさに分岐点を迎えた。ITER および核融合炉における核燃焼プラズマの振る舞いを予測、その制御手法を確立する上で、統合シミュレーションコードの開発は最重要課題と考えられる。燃焼プラズマ統合コード(Burning Plasma Simulation Initiative)はボランティアな活動として 2002 年 7 月 31 日に準備会を発足させ、今日に至る(<http://bpsl.nucleng.kyoto-u.ac.jp/bpsl/>)。核燃焼プラズマ統合コード構想とその進展に関する詳細に関しては、文献(福山淳、矢木雅敏、J. Plasma Fusion s. Vol. 81, No. 10 (2005) 747-754)をご覧ください。今回、この研究活動を加速させるために九州大学応用力学研究所の特定研究として応募し、この研究成果をもとに大型外部資金に応募できたと考えている。核燃焼プラズマ統合コード構想の活動は、(1) 統合コードのフレームワーク開発、(2) 統合コードに必要な階層型物理モデルの開発、(3) 効率的な分散並列処理の実現の 3 つ集約されるが、本特定研究においては 5 つのサブテーマ (1) 多スケール・拡張 MHD の理論シミュレーション研究、(2) 多スケールプラズマ乱流シミュレーション研究、(3) 核燃焼プラズマ統合コードにおける周辺プラズマモデリング、(4) 核燃焼プラズマ統合コードにおける輸送と加・電流駆動のシミュレーション、(5) プラズマ輸送理論、から構成され BPSI を支援する体制になっている。

BPSI開発計画ロードマップ



に BPSI 開発計画ロードマップを示す。ITER BA の一貫として六ヶ所村にシミュレーションセンターが建設され、5 年後にスパコンが導入される予定であるが、それまでに第 1 期開発計画の完了めざす。この特定研究においては、階層型物理モデルの開発という点において貢献できればと考えている。

多スケール・拡張 MHD の理論シミュレーション研究

日本原子力研究開発機構

核融合研究開発部門

先進プラズマ研究開発ユニット

プラズマ理論シミュレーショングループ

徳田 伸二

研究目的

核燃焼プラズマにおいては、時間尺度及び空間尺度の異なる諸現象（MHD、微視的乱流等）が定性的に異なる空間領域に跨って相互作用し、その結果として核融合炉の特性が決まる。それを総合的に理解し、予測するためには輸送、MHD、乱流の相互作用を考慮したグローバルシミュレーションが必要であると認識されつつある。

本研究では（１）プラズマと炉の構成部分（壁および外部回路）との巨視的な電磁的相互作用、（２）プラズマ周辺における MHD 現象およびそれとコアプラズマとの相互作用並びに（３）核融合炉における MHD 不安定性の飽和・抑制や突發現象を解明するための理論・シミュレーションモデルを開発し、核融合炉の MHD 特性の総合的な解析を可能にするとともに、核燃焼プラズマの統合シミュレーションを実現する上で必要なモデルを提供することを目的とし、九州大学応用力学研究所（矢木）が中心となって進めている核燃焼プラズマ統合コード計画の一環として行うものであるため、共同研究として進めた。研究成果は第 5 回 Burning Plasma Simulation Initiative Annual Meeting（平成 18 年 12 月 21-22 日、九州大学応用力学研究所）で発表された。

研究成果報告

（１）に関しては、磁気流体力学安定性解析コード MARG2D において高 n (n : トロイダルモード数外部モード（ピーリング-バルーニング・モード）解析を可能とし、それを行う他のコードとして ELITE コードとのベンチマークテストを進め、成長率、固有関数についてよい一致を得、MARG2D コードが低 n から高 n モードまでの安定性が解析可能であることを確認され[1]、トカマク周辺 MHD 安定性に関するプラズマ形状の効果の研究が進展した[2]。

（２）に関しては、並列化された MARG2D コードを PC クラスター上で実行し、輸送コードをパソコン上で実行して、CPU 時間のバランスを取る計算環境を構築し統合シミュレーションを実現した[4]。さらに、MHD 安定性解析の計算負荷の低減、さらには実時間制御への応用を目指して、MARG2D コードのハード化に着手した[6]。（３）に関しては、回転プラズマにおける強制磁気再結合の非線形シミュレーション研究[3]を進めると共に、完全トーラス配位圧縮性 MHD シミュレーションコードの開発においてはプラズマと外部領域との相互作用を目指して自由境界 MHD シミュレーションモデルの構築を行った[5]。また、拡張 MHD シミュレーションモデルの研究[7, 8]及び乱流と MHD モードとの他スケール相互作用に関するシミュレーション研究[9]が進展した。

成果リスト

論文

- [1] N. Aiba, S. Tokuda, T. Fujita, T. Ozeki, M. S. Chu, P. B. Snyder, and H. R. Wilson, Numerical Method for the Stability Analysis of Ideal MHD Modes with a Wide Range of Toroidal Mode Number in Tokamaks, accepted for publication in J. Plasma and Fusion Res.
- [2] N. Aiba, S. Tokuda, T. Takizuka, G. Kurita, and T. Ozeki, Effects of ‘Sharpness’ of the Plasma Cross-Section on the MHD Stability of Tokamak Edge Plasmas, Submitted to Nuclear Fusion.
- [3] 石井康友、安積正史、Andrei Smolyakov, Nonlinear evolution and deformation of the driven magnetic island in the rotating plasma, Submitted to Nuclear Fusion.

学会発表等

- [4] N. Hayashi, T. Takizuka, T. Ozeki, N. Aiba, N. Oyama, Integrated Simulation of ELM Energy Loss Determined by Pedestal MHD and SOL Transport, 21st IAEA Fusion Energy Conference (Chengdu, China, 2006, Dec) TH/4-2.
- [5] 影井康弘、岸本泰明、三好隆博、有限体積法 full-MHD コードによる自由境界 MHD シミュレーション、第 23 回プラズマ・核融合学会年会（平成 18 年 12 月 1 日、つくば市）
- [6] S. Tokuda, Development of Eigenvalue Solver by MHD Stability Analysis Code MARG2D, 5th Burning Plasma Simulation Initiative Annual Meeting, 平成 18 年 12 月 21～22 日、九州大学応用力学研究所
- [7] Y. Todo, Construction of kinetic electromagnetic plasma model via interpolated fluid method, 5th Burning Plasma Simulation Initiative Annual Meeting, 平成 18 年 12 月 21～22 日、九州大学応用力学研究所
- [8] H. Naito, Effect of Ion Landau Damping on Vorticity Generation in Internal Kink Mode, 5th Burning Plasma Simulation Initiative Annual Meeting, 平成 18 年 12 月 21～22 日、九州大学応用力学研究所
- [9] A. Ishizawa, Interaction between MHD, Micro Turbulence and Zonal Flow, 5th Burning Plasma Simulation Initiative Annual Meeting, 平成 18 年 12 月 21～22 日、九州大学応用力学研究所

多スケールプラズマ乱流シミュレーション研究

九州大学応用力学研究所

矢木雅敏

1. はじめに

核燃焼プラズマにおいては、時間尺度および空間尺度が異なるさまざまな現象が、定性的に異なる空間領域にまたがって、相互にかつ複雑に関与しつつ、時間発展している。プラズマのエネルギー閉じ込め特性を理解するためには、輸送、MHD、乱流の相互作用を考慮したグローバルシミュレーションが必要であることは認識されつつある。しかし、そのようなシミュレーションを第一原理に基づいて行うには計算機のリソースが十分とは言えず、モデル化や方程式の簡約化が必要である。本研究では、核融合プラズマにおける階層シミュレーションの出発点として、MHD とドリフト波乱流の相互作用を考慮したグローバルシミュレーションを加熱項が存在する場合に行い、輸送、MHD、乱流の相互作用を明らかにすることを目的とする。これにより輸送障壁形成の機構解明をめざす。また、多スケール乱流シミュレーションを粒子・流体ハイブリッド乱流モデルや第一原理に基づいて行い、飽和機構の解明や輸送係数の評価をめざす。さらに階層シミュレーションに適した計算機環境やコードのチューニングも併せて行っていく予定である。

2. グローバル ITG シミュレーションによる内部輸送障壁の生成・崩壊機構の研究

近年、反転磁気シャー配位(RS)を採用し放電において内部輸送障壁が生成され異常輸送が抑制されることが報告されている。異常輸送を生み出すプラズマ乱流の飽和メカニズムは、帯状流による乱流の抑制が重要な役割を果たすことが報告されているが、内部輸送障壁の生成や崩壊のメカニズムに関してはまだ十分理解されていない。これら未解明の非線形現象の解明にはマルチスケールのダイナミクスを取り扱っていく必要がある。本研究においては、乱流の非局所的な効果を調べるため、輸送・乱流・帯状流のマルチスケール間相互作用を取り扱うことのできるグローバル ITG コードを開発し、内部輸送障壁の生成崩壊機構を研究する。具体的な方法としてはモデルに熱源項を導入し、RS 配位において加熱プロセスのシミュレーションを行った。

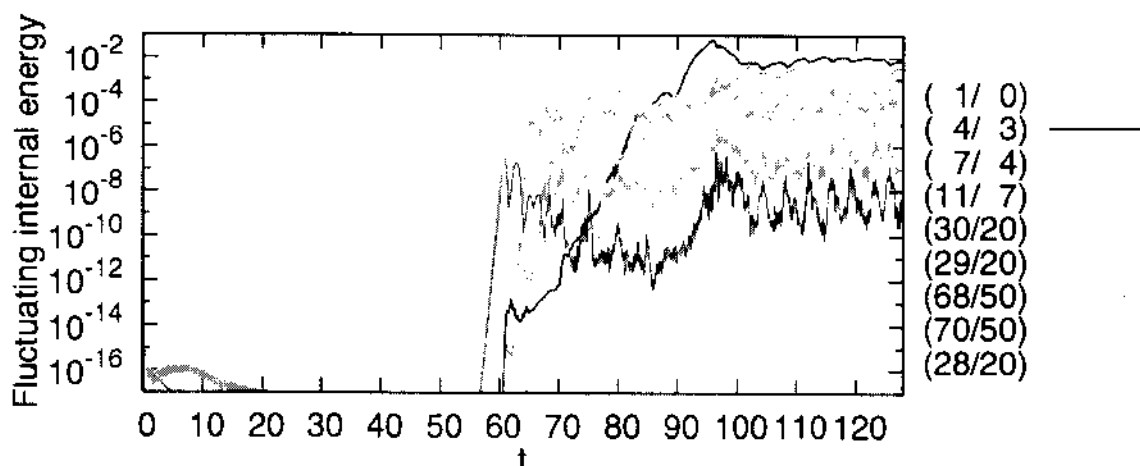


図 1

用いたモデルは文献[M. Ottaviani, et al., Phys. Plasmas **6** 3267 (1999)]に与えられる。RS 配位は文献[X. Garbet, et al., Phys. Plasmas **8** 2798 (2001)]に与えられるモデルを用いた。図 1 に揺動内部エネルギーの時間発展を示す。 $t < 50$ ではイオン温度分布の形成過程で温度勾配が ITG モードの閾値より低い
ため揺動は発展しない。 $t > 50$ で (30,20),(68,50)等の揺動が $r \sim 0.4$, $r \sim 0.6$ 付近でそれぞれ不安定
化し線形成長を始める。また、非線形相互作用により(7,4), (4,3), (11,7)等の低(m,n)モードが強く励
起され、グローバルな構造の変化をもたらす。図 2 に温度分布の時間発展を示す。

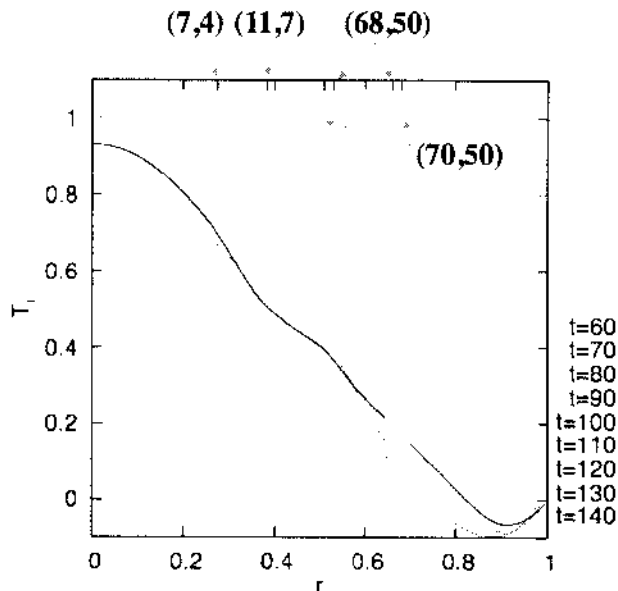


図 2

$t = 60$ ではほぼ拡散方程式に従って分布
が發展しており、揺動の發展が始まると
輸送障壁が $r = 0.6$ 近傍に形成される。
 $t = 90$ を過ぎると障壁は崩壊し、内側の
 $r = 0.3$ と外側の $r = 0.7$ に障壁が形成され
維持されているのがわかる。輸送障壁の
崩壊は(4,3)モードの成長とともに起きて
いる。このモードは(7,4),(11,7)の非線形
結合により励起されるが非共鳴モードで
あり(このケースでは $q_{min} = 1.35$)、グロー
バルなモード構造をもつ。本研究により
非局所的な非線形効果により誘起された
非共鳴モードが輸送障壁の崩壊過程に影

響を与える一例を示すことができた。今後の課題として帯状流の生成と輸送障壁の形成機構の関連
について調べる予定である。

3. 研究組織

研究代表者

九州大学応用力学研究所 矢木雅敏

研究協力者

京都大学 岸本泰明、鵜沢憲、三木一弘、Johan Anderson

日本原子力研究開発機構 宮戸直亮、井戸村泰宏、鈴木喜雄、松本太郎

核融合科学研究所 石澤明宏、渡辺智彦、洲鎌英雄

海洋研究開発機構地球シミュレータセンター 陰山聡、草野完也

九州大学総合理工学府 徳永晋介、西村征也、林高行、濱田大地

参考文献・講演発表

[1] Turbulence spreading in reversed shear plasmas

M Yagi, T Ueda, S-I Itoh, M Azumi, K Itoh, P H Diamond and T S Hahn

Plasma Phys. Control. Fusion Vol.48, No.5A, A409-A418, 2006

[2] Study of Thermal Transport Effects on Drift-Tearing Mode, Reports of Research Institute for Applied Mechanics, N.

Seiya, S.-I. Itoh, M. Yagi, M. Azumi and K. Itoh, Kyushu University No. 131, P.1-12, Sep. 2006

[3] Turbulence spreading in reversed shear plasmas

矢木雅敏、日本地球惑星科学連合 2006 年大会、横浜幕張メッセ、2006 年 5 月

[4] 核融合研究統合コード・現状と展望

矢木雅敏、RIAM フォーラム 2006、九州大学応用力学研究所、2006 年 6 月

[5] ドリフトテアリングモードにおける熱輸送効果

西村征也、伊藤早苗、矢木雅敏、安積正史、RIAM フォーラム 2006、九州大学応用力学研究所、2006 年 6 月

[6] 核燃焼プラズマ統合コードにおける課題

矢木雅敏、第 21 回トライアム研究会&核融合フォーラムサブクラスター会合同研究会

周辺プラズマ及び PWI 研究の進展ーモデリングとシミュレーション、九州大学応用力学研究所、2006 年 8 月

[7] Nonlinear interaction between drift wave and tearing mode

矢木雅敏、KAIST (国際会議 Japan-Korean workshop) , Daejeon, Korea, 2006 年 8 月

[8] ドリフト-テアリングモードにおける熱輸送効果 (非線形シミュレーション)

西村征也、伊藤早苗、矢木雅敏、安積正史、日本物理学会 2006 年秋季大会、千葉大学、2006 年 9 月

[9] 森の射影演算子法を用いた VZSC モデルの解析

濱田大地、伊藤早苗、矢木雅敏、森肇、安積正史、プラズマ・核融合学会第 23 回年会、筑波大学、2006 年 11 月

[10] テアリングモードと衝突性ドリフト波の相互作用の研究

林高行、伊藤早苗、矢木雅敏、安積正史、プラズマ・核融合学会第 23 回年会、筑波大学、2006 年 11 月

[11] イオン温度勾配駆動型ドリフト波乱流の非線形シミュレーション研究

徳永晋介、伊藤早苗、矢木雅敏、安積正史、プラズマ・核融合学会第 23 回年会、筑波大学、2006 年 11 月

[12] イオン温度勾配駆動型ドリフト波乱流の非線形シミュレーション研究

徳永晋介、伊藤早苗、矢木雅敏、安積正史、プラズマ核融合学会 九州・山口・沖縄支部第 10 回支部大会、九州大学、2006 年 12 月

[13] 森の射影演算子法を用いた VZSC モデルの解析

濱田大地、伊藤早苗、矢木雅敏、森肇、安積正史、プラズマ核融合学会 九州・山口・沖縄支部第 10 回支部大会、九州大学、2006 年 12 月

[14] テアリングモードと衝突性ドリフト波の相互作用の研究

林高行、伊藤早苗、矢木雅敏、安積正史、プラズマ核融合学会 九州・山口・沖縄支部第 10 回支部大会、九州大学、2006 年 12 月

[15] はじめに

矢木雅敏、第五回核燃料プラズマ統合コード研究会、九州大学応用力学研究所、2006 年 12 月

[16] ドリフト-テアリングモードにおける輸送の効果

西村征也、第五回核燃料プラズマ統合コード研究会、九州大学応用力学研究所、2006 年 12 月

[17] グローバル ITG 乱流コードを用いた輸送シミュレーション

徳永晋介、第五回核燃料プラズマ統合コード研究会、九州大学応用力学研究所、2006 年 12 月

[18] テアリングモードと衝突性ドリフト波の相互作用の研究

林高行、第五回核燃料プラズマ統合コード研究会、九州大学応用力学研究所、2006 年 12 月

[19] 森の射影演算子法を用いた衝突性ドリフト波カオスの研究

濱田大地、第五回核燃料プラズマ統合コード研究会、九州大学応用力学研究所、2006 年 12 月

核燃焼プラズマ統合コードにおける周辺プラズマモデリング

日本原子力研究開発機構 核融合研究開発部門 滝塚知典

・ 目的

核燃焼プラズマにおいては、時間尺度および空間尺度が異なるさまざまな現象が、定性的に異なる空間領域にまたがって、相互にかつ複雑に関与しつつ、時間発展している。特に開いた磁場構造を有する周辺プラズマ領域は、閉磁気面に閉じ込められた中心プラズマと大きく異なる物理機構に支配されながら、中心プラズマ領域と強く相互に影響を及ぼしている。また、周辺プラズマのダイバータは核燃焼プラズマにおける粒子と熱の制御には不可欠なものである。本研究では、これまでに大学・研究所において開発されてきた周辺プラズマシミュレーションコード群をモジュールとして、核燃焼プラズマ統合コードに統合化することを目標とする。コード群には大規模シミュレーションコードも含まれており、これらのコードについては直接的統合化は現状では困難である。したがって、大規模シミュレーション結果に基づいて、統合コードのための周辺プラズマモデリングを構築することも本研究の目的である。

このプロジェクトは九州大学応用力学研究所（矢木）が中心となって進めている核燃焼プラズマ統合コード計画（Burning Plasma Simulation Initiative）の主要な一環をなすものである。共同研究として申請するものである。また、この研究課題で扱っている原子力機構開発のダイバータシミュレーションコードは、応用力学研究所で計画されているST装置のダイバータ設計に活用されており、この共同研究の意義は大きい。

・ 研究方法

- 1) 粒子シミュレーションによる周辺プラズマモデリングのための基礎物理データベース作成
- 2) 大規模ダイバータシミュレーションによる周辺プラズマモデリングのためのダイバータシミュレーションデータベース作成
- 3) 基礎物理データベースに基づいた周辺プラズマモデリングの構築
- 4) ダイバータシミュレーションデータベース及びダイバータ実験データベースに基づいた周辺プラズマモデリングの構築
- 5) 統合コードのための周辺プラズマ簡易コードの開発
- 6) 周辺プラズマ簡易コードを統合化した核燃焼プラズマ統合コードによるシミュレーション

・ 研究の経過報告

1) 原子力機構で開発している先進的粒子コード PARASOL[2]を用いて、ELM 崩壊により SOL 領域に突発的に流出する粒子と熱の過渡的な伝搬についてシミュレーションを行い、運動論的效果による熱輸送特性について調べた [16,18]。また 2 次元 PARASOL コードにより、SOL に囲まれた磁場閉じ込めプラズマにおける電場形成についてシミュレーションを行い、規格化半径が大きくなると径方向電場の向きが遷移することを見出した[10]。京大で開発しているジャイロ運動論モデルシミュレーションと粒子シミュレーション結果を比較しつつシース形成に及ぼす磁場の影響を調べた[5]。モンテカルロ法による中性粒子輸送シミュレーションについては、原子力機構の NEUT2D [1, 3, 9]、筑波大では DEGAS [8,15]を用いて研究を進めている。またモンテカルロ法を用いた不純物輸送シミュレーションについては、原子力機構の IMPMC[1,7]、慶応大学では IMPGYRO[6]を用いて研究を進めている。

2) 原子力機構で開発している統合ダイバータコード SONIC[1,7,17]はダイバータプラズマ

流体コード SOLDOR/中性粒子輸送モンテカルロコード NEUT2D/不純物輸送モンテカルロコード IMPMC を無撞着に結合したものである。この SONIC コードを用いて JT-60U 中の MARFE の形成についてシミュレーションを行った[11]。不純物輸送は簡易放射冷却モデルを採用した SOLDOR/NEUT2D 結合コードを用いて、JT-60U のダイバータ実験解析および JT-60SA ダイバータ予測シミュレーションを行い中性粒子輸送に密接に関連するダイバータ密度制御特性を調べた[3,9,12,17]。慶應大では SOLPS5.0 を用いて、SOL ダイバータプラズマにおけるドリフトの重要性を調べた[6,19]。SOLPS5.0 は、不純物を含めたプラズマ流体扱う B2 コードと中性粒子輸送をモンテカルロ法で扱う Eirene コードの統合コードである。

3) ダイバータ板近傍におけるダスト粒子の振るまいについて、理論および粒子シミュレーションにより基礎的物理特性を調べた[4,13,21,22]。

4) PARASOL シミュレーションの結果から、これまで流体モデルに適用できるいくつかの物理モデルの解析的表現を提示している。今回の ELM シミュレーションの結果[18]も解析的表現して簡易流体モデル（ポイントモデル）に適用した[14]。

5) 原子力機構において、ELM の熱流を記述できる動的ポイントモデルを開発した。この簡易モデルは、PARASOL シミュレーションやダイバータ流体シミュレーションの結果を良く再現した[14]。慶應大は電中研と協力して簡易 SOL-ダイバータポイントモデルを開発している。0 次元コアプラズマとの結合コードにより、次期トカマク装置の運転領域最適化を行うことができた[6]。

6) 原子力機構においては、コアプラズマ輸送と周辺プラズマ輸送とを統合的にシミュレーションするために TOPIC-IB コードの開発を進めている[23]。SOL プラズマの輸送は(5)に記した動的ポイントモデルを導入している。ELM の動的挙動をこの TOPIC-IB を用いてシミュレーションすることに成功した[24]。

・研究成果報告

- [1] T. Takizuka, K. Shimizu, H. Kawashima, N. Hayashi, M. Hosokawa, "SOL-Divertor Simulation Code System with Fluid Modeling, Monte-Carlo Modeling and PIC Modeling", Japan-Korea WS on Theory and Simulation of Magnetic Fusion Plasmas, Aug 2006, Daejeon, Korea.
- [2] T. Takizuka, M. Hosokawa, "Present Status and Future Plan of PARASOL Simulation", 第 5 回 BPSI 研究会, 2006 年 12 月、九大応力研.
- [3] H. Kawashima, K. Shimizu, T. Takizuka, "Present Status of SOL/Divertor Simulation Study on JT-60U/JT-60SA by SONIC Code", *ibid.*
- [4] Y. Tomita, R. Smirnov, T. Takizuka, D. Tskhakaya, "Detachment Condition of Dust Particle from Plasma-Facing Wall by Scopic Code", *ibid.*
- [5] G. Kawamura, A. Fukuyama, "Gyrokinetic Approach for Magnetic Sheath Formation", *ibid.*
- [6] 畑山明聖, "周辺・ダイバータプラズマのシミュレーションとモデリング", 第 21 回トライアム研究会&核融合フォーラムサブクラスター会合同研究会, 2006 年 8 月、九大応力研.
- [7] 清水勝宏, "統合ダイバータコード SONIC の開発", *ibid.*
- [8] 中嶋洋輔, "ガンマ 10 における高速カメラを用いた周辺プラズマ計測と中性粒子輸送シミュレーション", *ibid.*
- [9] 川島寿人, "JT-60U における SOL/ダイバータシミュレーション研究の現状", *ibid.*
- [10] T. Takizuka, "PARASOL Simulation of Electrostatic Potential Structure in Core and SOL-Divertor Plasmas", US-Japan WS on Integrated Modeling of Fusion Plasmas, Jan 2007, Oak Ridge, USA.
- [11] K. Shimizu, T. Takizuka, H. Kawashima, "Modeling of Plasma and Impurity Transport in MARFE Plasma", 17th PSI, May 2006, Hefei, China; to be published in J. Nucl. Mater..

- [12] H. Kawashima, K. Shimizu, T. Takizuka, et al., "Simulation of Divertor Pumping in JT-60U with SOLDOR/NEUT2D Code", 17th PSI, May 2006, Hefei, China; to be published in J. Nucl. Mater.
- [13] Y. Tomita et al., "Effect of Truncation of Electron Velocity Distribution on Release of Dust Particle from Plasma-Facing Wall", 17th PSI, May 2006, Hefei, China; to be published in J. Nucl. Mater.
- [14] N. Hayashi, T. Takizuka, M. Hosokawa, "Modeling of Dynamic Response of SOL-Divertor Plasmas to an ELM Crash", 17th PSI, May 2006, Hefei, China; to be published in J. Nucl. Mater.
- [15] Y. Nakashima et al., "Investigation of Neutral Particles Using High Speed Camera and Monte-Carlo Simulation in the GAMMA 10 Central-cell", Open System 2006, July 2006, Tsukuba; to be published in Trans. Fusion Sci. Tech.
- [16] T. Takizuka, M. Hosokawa, "Dynamics of One-dimensional SOL-divertor Plasmas after an ELM Crash in Tokamak H-mode Plasma", Open System 2006, July 2006, Tsukuba; to be published in Trans. Fusion Sci. Tech.
- [17] H. Kawashima, K. Shimizu, T. Takizuka, "Development of Integrated SOL/Divertor Code and Simulation Study of JT-60U/JT-60SA Tokamaks", IEA Large Tokamak WS on Edge Transport in Fusion Plasmas, Sep 2006, Kracow, Poland; to be published Plasma Phys. Control. Fusion.
- [18] T. Takizuka, M. Hosokawa, Contrib. Plasma Phys. 46 (2006) 698.
- [19] K. Hoshino, A. Hatayama, et al., Contrib. Plasma Phys. 46 (2006) 591.
- [20] K. Miyamoto, A. Fukano, A. Hatayama, Contrib. Plasma Phys. 46 (2006) 643.
- [21] Y. Tomita, R. Smirnov, T. Takizuka, D. Tskhakaya, Contrib. Plasma Phys. 46 (2006) 617.
- [22] R. Smirnov, Y. Tomita, D. Tskhakaya, T. Takizuka, Contrib. Plasma Phys. 46 (2006) 623.
- [23] T. Ozeki, N. Aiba, N. Hayashi, T. Takizuka, et al., "Integrated Simulation Code for Burning Plasma Analysis", Fusion Sci. Tech. 50 (2006) 68.
- [24] N. Hayashi, T. Takizuka, et al., "Integrated Simulation of ELM Energy Loss Determined by Pedestal MHD and SOL Transport", 21st IAEA Fusion Energy Conf., Oct 2006, Chengdu, China; Submitted to Nucl. Fusion.

・研究組織

氏 名	所 属	職 名	役割／担当分野
滝塚 知典	原子力機構	研究副主幹	代表者／モデリング・粒子シミュレーション
畑山 明聖	慶応大	教授	ダイバータモデリング・シミュレーション
富田 幸博	核融合研	助教授	境界層プラズマ理論・モデリング
清水 勝宏	原子力機構	研究主幹	ダイバータシミュレーション
中嶋 洋輔	筑波大	助教授	ペデスタルモデリング
川島 寿人	原子力機構	研究副主幹	ダイバータシミュレーション
高山 有道	核融合研	助手	周辺プラズマシミュレーション
日渡 良爾	電中研	主任研究員	周辺プラズマ輸送モデリング・シミュレーション
河村 学思	京大	D2	境界層プラズマ粒子シミュレーション
矢木 雅敏	九大	教授	所内世話人

目的

核燃焼プラズマにおいては、時間尺度と空間尺度が異なるさまざまな現象が、定性的に異なる空間領域にまたがって、相互にかつ複雑に関与しつつ、時間発展している。自律性の高い核燃焼プラズマの全体像を捉えるためには、それらの現象の間の相互作用を取り入れた統合的なシミュレーションによる時間発展の解析が必要である。本研究では、プラズマの形状と空間分布を支配する平衡・輸送コードによる時間発展解析と中性粒子ビームや各種の電磁波による加熱とプラズマ制御の解析を組み合わせた統合シミュレーションを実現するためのコード開発とそれによるトカマク実験データの解析を行う。ITER データベース等の実験データとの比較を行うことによって輸送モデルの信頼性を高めるとともに、周辺プラズマ解析コードとの結合を検討する。

研究方法

- 核燃焼プラズマ統合コードに必要なモジュール間連携機能の策定と実装
- プラズマ回転および径方向電界を取り入れた流体型輸送コードの開発
- 中性粒子ビーム加熱と高速イオン閉じ込めのシミュレーション
- 運動量分布関数の変形を取り入れたイオンサイクロトロン波加熱および電子サイクロトロン波電流駆動の統合シミュレーション
- 有限ラーモア半径効果を取り入れた積分方程式による波動伝播解析

研究結果

1. **モジュール間連携機能**：モジュール間の連携を容易に実現するため、データ交換用標準データセットおよび標準インターフェースならびに実行制御用標準インターフェースを定義し、TASK/PL に実装してトカマク統合シミュレーションを行った。この実装に伴って、TASK コードの標準コンパイラをFORTRAN77 から FORTRAN95 に変更した。
2. **輸送解析**：流体型輸送方程式の定式化を行うとともに輸送モジュール TASK/TX を開発し、その妥当性を検証するとともに、プラズマ回転および径方向電界の時間変化を含めた輸送シミュレーションを行い、NBI 入射に伴うトカマクプラズマの密度分布変化を再現できることを示した。
3. **NBI 加熱解析**：JAEA において開発された統合コード TOPICS から切り出された NBI 解析モジュール TOPICS/NBI との連携を可能にし、NBI 加熱を伴う輸送シミュレーションを行った。
4. **波動加熱解析**：速度分布関数の変形を含めた波動伝播解析について、予備的な数値解析を行い、イオンサイクロトロン波少数イオン加熱において加熱領域の幅が広がることが示された。その後、波動伝播モジュール TASK/WM の精度向上のため、計算アルゴリズムの変更（係数評価の差分化、径方向の有限要素法化）を行った。
5. **波動伝播解析**：有限ラーモア半径効果を取り入れた運動論的誘電率テンソルを積分形で記述する定式化を1次元スラブ配位から3次元トーラス配位に拡張した。TASK/WM への実装を進めている。

考察

モジュール間連携機能の標準化、原子力機構により開発されている統合コード TOPICS との連携、波動加熱の統合化等により、核燃焼プラズマ統合シミュレーションの実現に向けて大きく前進した。今後、さら

に要素モジュールの機能強化や新規開発，ユーザーインターフェースの標準化等を行うとともに，実験データとの比較による妥当性の検証や他のコードとのベンチマークテストを進めていく必要がある。

研究成果報告

1. A. Fukuyama, M. Honda: Integrated Modeling of Tokamak Plasmas by TASK Code, Korea-Japan Workshop on Theory and Simulation of Magnetic Fusion Plasmas (KAIST, Daejeon, Korea, 2006-08-16)
2. A. Fukuyama: Advanced Full Wave Analyses in Tokamak Plasmas, US-Japan Workshop on RF Heating Physics (奈良県新公会堂, 奈良, 2006-09-30)
3. A. Sonoda, A. Fukuyama: Full Wave Analysis of Cyclotron Waves Using an Integral Form of Dielectric Tensor, US-Japan Workshop on RF Heating Physics (奈良県新公会堂, 奈良, 2006-09-30)
4. A. Fukuyama, S. Murakami, A. Sonoda, M. Honda: Integrated Full Wave Analysis of RF Heating and Current Drive in Toroidal Plasmas, IAEA Fusion Energy Conference (Chengdu, China, 2006-10-20) TH/P6-10
5. 福山淳, 本多充, 一桐正志, 安積正史, 矢木雅敏: モジュール間連携機構を用いたトカマク統合シミュレーション, 第23回プラズマ・核融合学会年会(筑波大学大学会館, 2006-11-28) 28pC03
6. 本多充, 福山淳: 回転を伴うトロイダルプラズマの流体型輸送シミュレーション, 第23回プラズマ・核融合学会年会(筑波大学大学会館, 2006-11-28) 29AC26P
7. 園田旭胤, 福山淳: 有限ラーモア半径効果を取り入れた積分形誘電率による2次元波動伝播解析, 第23回プラズマ・核融合学会年会(筑波大学大学会館, 2006-11-28) 29AC27P
8. 福山淳: 統合モデリングコードによる燃焼プラズマシミュレーション, 第23回プラズマ・核融合学会年会(筑波大学大学会館, 2006-11-30) VI-3
9. A. Fukuyama: Present Status and Future Plan of TASK Code, 第5回核燃焼プラズマ統合コード研究会(九州大学応用力学研究所, 2006-12-21)
10. 本多充, 福山淳: 回転を伴うトロイダルプラズマの流体型輸送シミュレーション, 第5回核燃焼プラズマ統合コード研究会(九州大学応用力学研究所, 2006-12-21)
11. A. Fukuyama: Recent Progress in Integrate Code TASK, US-Japan JIFT Workshop on Integrated Modeling on Fusion Plasmas (ORNL, 2007-01-29)
12. M. Honda, A. Fukuyama: Dynamic Transport Simulation code including Plasma Rotation and Radial Electric Field, US-Japan JIFT Workshop on Integrated Modeling on Fusion Plasmas (ORNL, 2007-01-31)
13. 福山淳: TASK コードによるトカマク統合シミュレーション, プラズマ・核融合研究における HPC ワークショップ(核融合科学研究所, 2007-01-24)
14. A. Fukuyama: Recent Progress in Integrated Modeling of Tokamak Plasmas, 3rd International Conference on the Frontiers of Plasma Physics and Technology (Bangkok, Thailand, 2007-03-07)

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
村上 定義	京都大学	助教授	加熱解析
中村 祐司	京都大学	助教授	輸送解析
本多 充	京都大学	D3	輸送解析
出射 浩	九大応力研	助教授	電流駆動解析
滝塚 知典	原子力機構	研究副主幹	輸送解析
濱松 清隆	原子力機構	研究主幹	加熱解析
林 伸彦	原子力機構	研究員	輸送制御解析

平成18年度応用力学研究所共同研究 特定研究3
「プラズマ輸送理論」成果報告書

代表者 核融合科学研究所 伊藤 公孝

研究目的

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

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

研究基盤の概観と今年度の成果の要点

本共同研究の基盤をなす乱流構造形成研究の方法論[1]を概観する。プラズマのダイナミクスを表現する基礎方程式として簡約化方程式を例にとって

$$\frac{\partial}{\partial t} f + L^{(0)} f = N(f) \quad (1)$$

と書こう。ここで $L^{(0)}$ は線形演算子、 f は揺動場（例えば $f = (\phi, J, p)^T$ ）、 $N(f)$ は非線型項をあらわす。

- (1) 非線型効果を、着目するモード（運動）にたいしてコヒーレントな効果と乱雑なノイズとして扱う効果とに区分する。

$$N(f) = -\Lambda f + \tilde{S} \quad (2)$$

- (2) コヒーレントな効果に着目し、方程式

$$(L^{(0)} + \Lambda) f = 0 \quad (3)$$

から非線型な自己無撞着状態を求める。この解は多重解を持ちうる。

- (3) ノイズによる着目するモードへの効果を解析する。特に、非線型な自己無撞着状態の間の遷移を研究する。遷移確率によって、可能な多数の非線型な自己無撞着状態のなかで、どの状態が選択的に実現するかを予言する。

従来より本体系によって研究成果をあげている。今年度の特筆すべき成果から例を挙げれば、乱流ノイズによる巨視的なモードの統計的励起と、それに起因する状態遷移確率、高閉じ込め状態の寿命を求めた。乱流が多スケールである場合の体系化を進め、メゾスケール揺動と微視的揺動の共存する系の乱流理論を一段と推進した。その典型的な例である zonal flow の総合報告を拡張し、輸送解析コードに取り入れる形への定式化を進めた事などがあげられる。

帯状流を着た乱流による輸送係数

メゾスケール揺動と微視的揺動の共存する系の乱流理論の進展と輸送解析コード屍の応用の研究例を紹介する[2]。この例は、上記方法論のレベル(2)を適用したものである。

乱流輸送係数については、ドリフト波が帯状流と共存し、エネルギーが帯状流との間で分配されることから、裸のドリフト波を考えた場合とは違いが顕著に現れる。帯状流

の減衰率に強く影響される。

不安定成長率が低い場合、裸のドリフト波が励起され

$$\chi_i = \frac{\gamma_L}{k_r^2} \quad (4)$$

となる。しかし、帯状流が共存すると、 γ_L が増すとエネルギーの増分は帯状流に渡され、ドリフト波への分配が抑えられる。例えば帯状流の衝突減衰率が大きい場合を考え強い乱流の表式を援用すると

$$\chi_i \sim \sqrt{\frac{v_{\text{damp}}}{\alpha}} \frac{\omega_*}{k_r^2} \quad (5)$$

となる。 $(v_{\text{damp}}$ は衝突効果による帯状流の減衰率、 ω_* はドリフト周波数である。)

更に γ_L が増した場合や、 v_{damp} が小さい場合には、帯状流の自己非線形機構がエネルギー配分や飽和振幅に重要な働きをする。

$$\chi_{\text{III}} = \frac{Ck_{\theta}^2 \rho_s^2 \omega_*}{2\alpha} \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{4\alpha}{Ck_{\theta}^2 \rho_s^2 \omega_*^2} (\gamma_L - \gamma_{L,c})} \right) \frac{\omega_*}{k_r^2} \quad (6)$$

の表式が得られ、 $\gamma_L \geq \gamma_{L,c}$ となつてはじめて乱流拡散が起きる。Upshift の境界は

$$\gamma_{L,c} = \frac{2\sqrt{2}}{C} \frac{q_r^2}{k_{\perp}^2} \omega_* \quad (7)$$

と与えられる。

こうした解析的結果を非線形シミュレーションの比較を図1に報告する。イオン温度勾配を種々に変えて成長率を変化させたシミュレーションの結果を点で示す。実線は解析的な理論式である。準定量的な一致が見られる。このように微視的な乱流揺動と準巨視的な帯状流の間のエネルギー配分比に関し理解が大いに進んだ。本研究の当初の目的を満たす成果である。

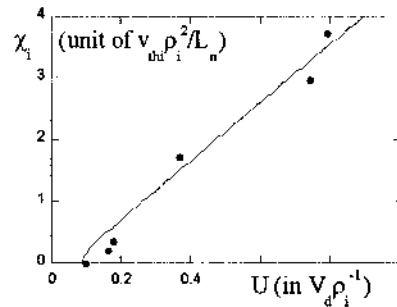


図1 ドリフト揺動と帯状流強さの関係

参考文献

- [1] 伊藤早苗：「乱流プラズマの構造形成と選択則の総合的研究」プラズマ核融合学会誌 83 巻 (2007) 印刷中
- [2] K. Itoh, S.-I. Itoh, P. H. Diamond, T. S. Hahm, A. Fujisawa, G. R. Tynan, M. Yagi and Y. Nagashima: Phys. Plasmas 13 No. 5 (2006) 055502

1. はじめに

低放射化フェライト鋼は、オーステナイト鋼に比べ、耐照射特性に優れた特性を持つことがこれまでの研究によって明らかにされており、過酷な中性子負荷が予想される核融合炉ブランケット構造第一壁としての使用が有望視されている。現在も多くの研究機関において、材料試験炉(核分裂炉)、核破砕中性子源、イオン加速器などを用いた照射研究が精力的に進められている。このように取得された照射データを最大限有効に活用し、今後の材料設計や炉運転指針に反映させるためには、核融合炉実環境における材料挙動を予測するための方法論(モデル化)を構築する必要がある。

これまで我々は、マルテンサイト鋼の母材元素である Pure-Fe や Fe-Cr モデル合金に対し、低エネルギーヘリウムを注入し、注入後のヘリウム放出挙動分析を行うことにより、材料中のヘリウム挙動の解析を行ってきた。ヘリウム放出に関する注入量依存性や昇温速度依存性を取得し、分子動力学解析[1]や他の純金属に関するヘリウム放出挙動[2]との比較から、ヘリウム捕獲欠陥の同定や解離エネルギーの導出などを行ってきた。また、特に転位に着目したヘリウム放出挙動分析およびヘリウム注入後の微細組織観察を行い、転位によるヘリウムの捕獲およびヘリウム分散化機能を明らかにしてきた[3]。さらに、相補的に、分子動力学計算手法による理論解析を行い[4]、上述の実験結果を詳細に理解する試みを行ってきた。分子動力学解析から得られる結合エネルギーは、実験から得られる解離温度と直接比較することが可能で、ヘリウムバブルの成長がバブル内のヘリウム圧力に強く依存することが明らかになった。昨年度は、連続体モデルに基づく理論解析を中心に、従来の分子動力学解析結果をマクロスケールへ外挿することの妥当性を確認することができた[5]。

本年度は、これまで主として行ってきたエネルギー論の評価結果を使い、ヘリウムバブル核生成・成長のキネティクスを調べた。マトリクス中の原子空孔濃度に対するヘリウム濃度の比が比較的大きな核融合炉ダイバータ材料の条件と、比較的小さな核融合炉第一壁環境の条件を調べ、これまでの多くの実験結果に矛盾しないモデルの構築を行った。

2. 方法

ヘリウムバブルを半径 R の球と仮定すると、バブルに流入する欠陥 i の正味のフラックスは、Wolferら[6]によれば、 $I_i = I_i^{\text{IN}} - I_i^{\text{OUT}} = 4\pi R Z D_i [C_i(\infty) - C_i(R)]/\Omega$ で与えられる。ここで、 Z は欠陥捕獲効率、 Ω は原子体積、 D_i は拡散係数、 $C_i(r)$ はバブル中心からの距離 r における欠陥濃度である。欠陥 i としては、格子間He、原子空孔、自己格子間原子(SIA)を採用した。この式から、 I_i の正負は、 I_i^{IN} と I_i^{OUT} の大小(もしくは、 $C_i(\infty)$ と $C_i(R)$ の大小)で決まることになる。

ここで簡単のため、系内に原子空孔のみが存在する場合を考える。通常、微小サイズのボイドに対しては、原子空孔の I_V^{IN} は I_V^{OUT} より小さく、したがって、 I_V は負になる。そのため、(I_V^{IN} と I_V^{OUT} を別々ではなく) I_V を扱う従来の反応速度論解析では、微小サイズのボイドが成長しないことになってしまうので、適当な核を仮定する必要があった。そこで本研究では、 I_V^{IN} と I_V^{OUT} を別々に評価し、ボイドに対する原子空孔の流入と流出の確率がそれぞれ I_V^{IN} と I_V^{OUT} に比例すると考えた。実際に空孔が流入するのか流出するのかは、モンテカルロ法を使って(サイコロを振って)決定した。このような手法を用いることにより、確率論的にボイドの核生成を扱うことが可能になる。実際、 $I_V = I_V^{\text{IN}} - I_V^{\text{OUT}} < 0$ の条件ではなかなかボイドは核生成しないが、ある程度

の潜伏期間が過ぎると、原子空孔の流入フラックスの確率論的ゆらぎの効果により、ボイドが核生成するようになる。同様に、原子空孔だけでなく、自己格子間原子SIAや格子間Heが系内に存在する場合も考え、ヘリウムバブルの核生成を調べた[7]。

3. 結果

図1は、原子空孔のみが存在する系のボイド核生成のシミュレーション結果である。潜伏期間は、温度とともに減少するが、これは、高温になるにつれ原子空孔の移動度が上昇するからである。しかしながら、630K以上になると、逆に、潜伏期間が増大し、650Kにおいては、シミュレーション期間中にボイドが核生成することはなかった。これは、650K付近に回復のステージV温度が存在することに対応する。図1の潜伏期間後のグラフの傾きは、ボイドの成長速度を表し、温度に依存する。このときのアレニウスプロットの傾きは、原子空孔の移動エネルギーに一致した。すなわち、ボイドの核生成・成長は、原子空孔拡散に律速した

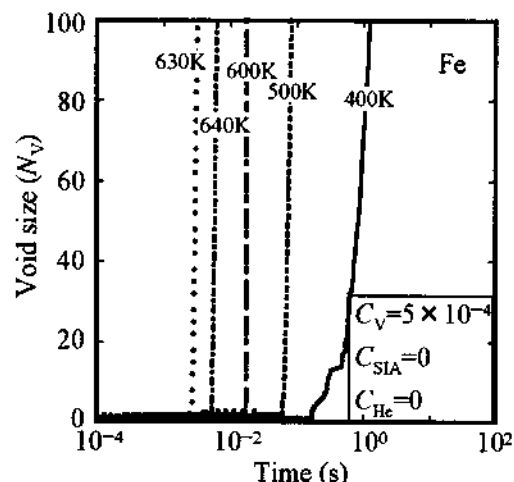


図1 ボイド核生成の温度依存性

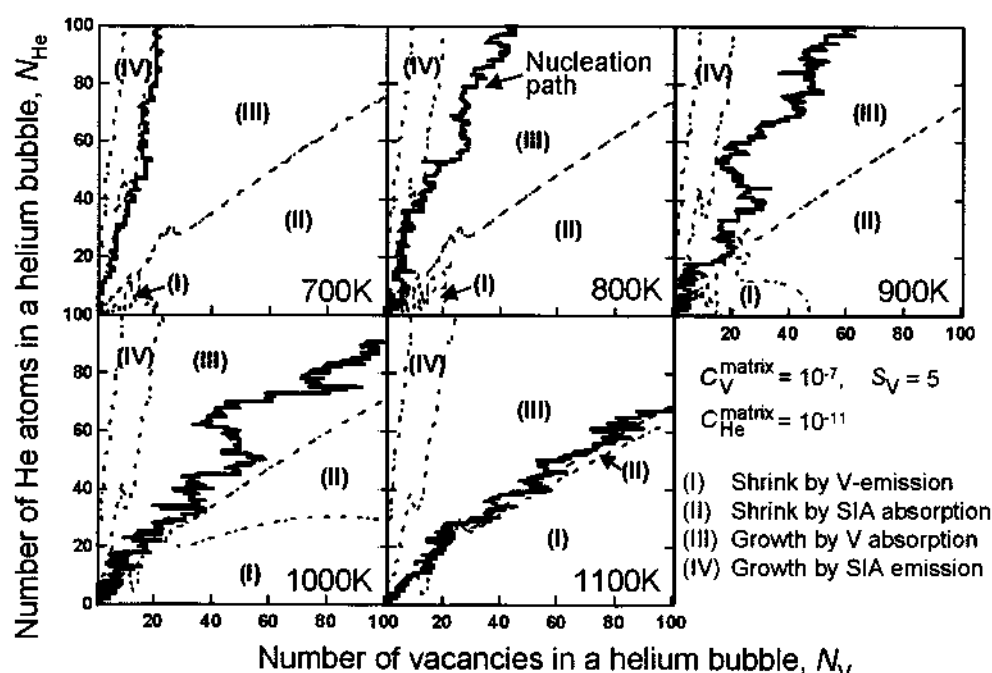


図2 Heバブルの核生成経路の温度依存性

反応であることになる。

次に、系内に、SIA、原子空孔、格子間Heが存在する場合を考える。図2の実線(太線)は、マトリックスの欠陥濃度 C_v^{matrix} を一定にした場合のバブルの核生成経路の温度依存性を表している。縦軸がバブル中のHe原子数、横軸がバブル中の原子空孔数を表すので、原点から引いた核生成経路の傾きは、そのバブル中のおおよそのHe密度を表

していることになる。つまり、高温ほどHe密度は低くなっている。逆に低温ではバブル中のHe密度は大きく、多くの低温照射実験結果を反映した結果になっていることがわかる。

マトリックス中の欠陥濃度や温度を変化させ、図1に示したようなバブル成長の時間発達を調べ、そこからバブルの成長速度を算出してアレニウスプロットを描いた。その結果、温度が高い場合や、マトリックス中のHe原子濃度が原子空孔濃度に比較して低い場合は、アレニウスプロットの傾きは、上述のボイドの場合と同様、原子空孔の移動エネルギーに一致した。一方、マトリックス中のHe原子濃度が比較的高い場合は、アレニウスプロットの傾きは格子間Heの移動エネルギーに一致した。前者は原子空孔拡散律速であるのに対し、後者はHe拡散律速であることを示す。特に後者の場合は、原子空孔が移動できないような低温であってもバブルが核生成することができる(このときのバブル核生成のメカニズムは、SIA放出機構(ループパンチング機構)である。)これらは、前者が核融合炉第一壁条件の照射で頻繁に観察され、後者が核融合炉ダイバータ材料条件で頻繁に観察される現象を定性的によく表しているといえる。

本年度は、上述の成果のほか、バブル移動[8]、バブルの欠陥捕獲効率(バイアス因子)の評価[9]、および、反応速度論解析[10]を行った。また、昨年度に引き続き、「核融合炉材料中の照射損傷過程のマルチスケールモデリング」検討作業会を実施した。

参考文献

- [1] K. Morishita, R. Sugano *et al.*, Proc. of PRICM4, JIM, p.1383, 2001
- [2] A. van Veen, NATO ASI Series B: Physics Vol.279.41, 1991
- [3] R. Sugano, K. Morishita, H. Iwakiri, N. Yoshida, J. Nucl. Mater., 307-311 (2002) 941.
- [4] K. Morishita, R. Sugano, B.D. Wirth, T. Diaz de la Rubia, J. Nucl. Mater., 323 (2003) 243.
- [5] Kazunori Morishita and Ryuichiro Sugano, Journal of Nuclear Materials, 353 (2006) 52.
- [6] W.G. Wolfer and M. Ashkin: J. Appl. Phys., 46 (1975), 547.
- [7] Kazunori Morishita, Philosophical Magazine 87 (2007) 1139.
- [8] Kazunori Morishita and Ryuichiro Sugano, Nuclear Instruments and Methods B 255 (2007) 52.
- [9] Kazunori Morishita, Nuclear Instruments and Methods B 255 (2007) 41.
- [10] Y. Watanabe, H. Iwakiri, N. Yoshida, K. Morishita, A. Kohyama, Nuclear Instruments and Methods B 255 (2007).

研究協力者

渡辺淑之、香山 晃(京大エネ理工研)、岩切宏友、吉田直亮(九大応力研)、加藤太治、室賀健夫(核融合研)、徐虬、義家敏正(京大原子炉実験所)、金田保則、陳迎(東大工)、坂口紀史(北大エネマテ)、中村信行(電通大レーザーセンター)

【目的】

D-T 核融合炉において、燃料として使用されるトリチウムは放射性核種であることから核融合炉内でのトリチウムの動態挙動の解明は、核融合炉の安全性評価の観点から非常に重要な課題である。

核融合炉におけるプラズマ対向壁材料としてグラファイトや炭化系セラミックスが考えられていると共に、そのコンディショニングとして炉内の不純物除去およびプラズマ中への不純物混入抑制を目的としたボロニゼーション等が検討・実施されている。昨年度までの共同研究では、これらの材料表面近傍におけるトリチウムの捕捉状態や脱離挙動について解明を行ってきた。しかし、D-T 核融合反応ではヘリウムが生成し、トリチウムと同様にプラズマ対向壁およびボロン化されたプラズマ対向壁に照射されることが考えられる。そこで、本年度の特定研究では照射されたヘリウムイオンがボロン膜中における高エネルギートリチウムの挙動に及ぼす化学的影響の解明について検討した。

【実験】

本研究で使用した試料は高純度ボロン膜および酸素含有ボロン膜である。なお、各ボロン膜は静岡大学においてプラズマ化学気相蒸着 (P-CVD) 装置を用いて調製した。X 線光電子分光(XPS)測定による組成分析の結果、高純度ボロン膜のボロン濃度は95%であり、酸素、炭素等の不純物の濃度は5%であった。酸素含有ボロン膜については、酸素濃度は35%であった。今年度は水素同位体の化学的挙動に及ぼすヘリウムイオン(He^+)照射効果の解明を目的として、九州大学応用力学研究所において9.0 keV 重水素イオン(D_3^+)照射のみ、および4.8 keV He^+ 照射した後 D_3^+ 照射を行った酸素含有ボロン膜に対して、それぞれ①昇温脱離(TDS)実験による重水素の脱離挙動および滞留量の評価、②XPS 測定による試料表面の化学状態分析を行った。また、 He^+ 照射した酸素含有ボロン膜に対して③走査型電子顕微鏡(SEM)による試料表面観察を行った。これらにより得られた実験結果は、昨年度得られた結果および静岡大学にて行った実験結果と比較し、検討した。なお、 D_3^+ 照射および He^+ 照射のエネルギーは打ち込み深さが同じ領域となるよう SRIM コードにより求めた値である。

【結果および考察】

図1に(a) 高純度ボロン膜および(b) 酸素含有ボロン膜に対して、 D_3^+ 照射のみと He^+ 照射した後、 D_3^+ 照射を行った際の D_2 TDS スペクトルを示す。図1(a)において、550 K 付近および700 K 付近の脱離は、それぞれ B-D-B および B-D 結合に捕捉された重水素の脱離、図1(b)における 550 K 付近、700 K 付近および900 K 付近の脱離は、それぞれ B-D-B、B-D および B-O-D 結合に捕捉された重水素の脱離であることをこれまでの研究で明らかにしてきた[1]。また、 He^+ 前照射をすることによって D_3^+ 照射のみの結果より重水素滞留量が増加することがわかる。特に、ボロンによる捕捉、すなわち B-D-B および B-D 結合として捕捉される重水素の量は増加するのに対して、B-O-D 結合として捕捉された重水素の量は若干の減少が見られた。これは He^+ 照射に伴い酸素がスパッタリングを受けたため、酸素による重水素捕捉サイトが減少し、重水素がボロンとより結合しやすくなったためと考えられる。

図2に静岡大学にて行った He^+ 前照射実験における B-1s XPS スペクトルのピークシフトを示す。図より B-B および B-O 結合の両ピークは、加熱処理後と比べて He^+ 前照射することによって大きく低エネルギー側へシフト

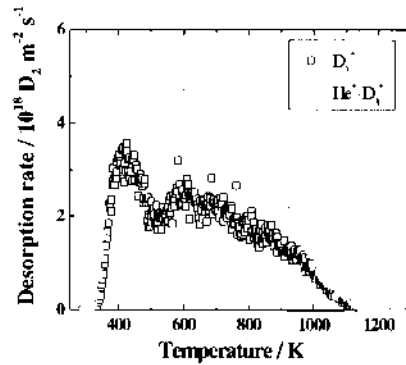
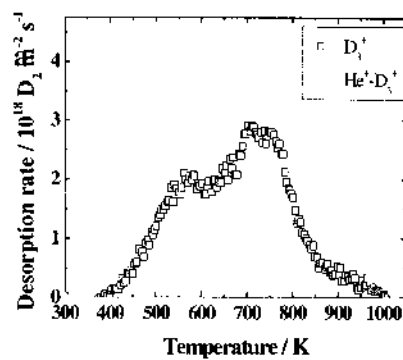


図1 D_3^+ および He^+ 照射した(a)高純度ボロン膜および(b)酸素含有ボロン膜

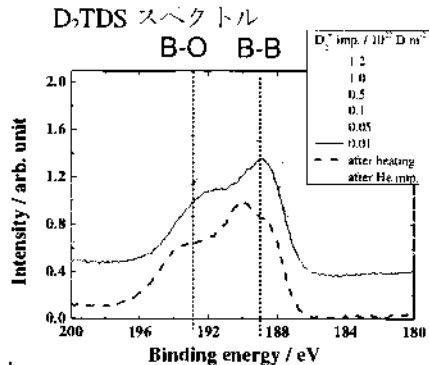


図2 He^+ 前照射実験におけるB 1s XPS スペクトル

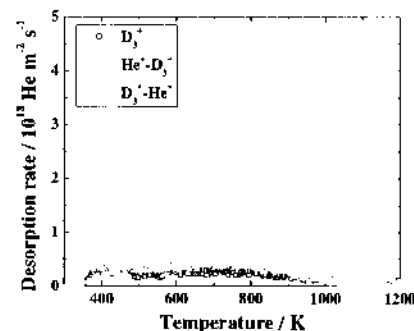


図3 D_3^+ および He^+ 照射した酸素含有ボロン膜からのHe TDS スペクトル

スパッタリングによる照射欠陥が形成され、その欠陥によりボロンによる重水素の捕捉サイトが増加したと考えられる。図3に酸素含有ボロン膜に対して、 D_3^+ 照射のみと He^+ 前照射した際のHe TDS スペクトルを示す。図より、 He^+ 後照射において850 K付近に鋭いピークが観測された。このピークは He^+ 後照射によって表面にブリスタが形成され、そのブリスタからの脱離であると考えられる。しかし、 He^+ 前照射ではブリスタの形成が確認できなかった。これは、 He^+ 照射により形成されたブリスタが D_3^+ 照射により壊されたためと考えられる。

【結論および今後の展望】

ボロン膜中での水素同位体挙動に及ぼす He^+ 照射効果を解明するために、高純度ボロン膜および酸素含有ボロン膜を調製し、 He^+ 前照射による重水素滞留量変化の測定を行った。実験結果より、高純度ボロン膜および酸素含有ボロン膜において、 He^+ 前照射により重水素滞留量が増加し、その増加はB-D-B結合やB-D結合としての重水素捕捉量の増加に起因していることが明らかになった。今後は、ボロン膜中の水素同位体およびヘリウムの化学的挙動についてより詳細に検討するため、静岡大学にて調製した酸素や炭素含有ボロン膜に対して D_3^+ あるいは He^+ のフルエンスを変化させて照射し、照射により捕捉された重水素の放出挙動および滞留量の変化、またヘリウム照射効果について明らかにする。また、各フルエンスのヘリウムイオン照射に伴う膜表面の構造変化についてSEM、透過型電子顕微鏡(TEM)および原子間力顕微鏡(AFM)を用いて解明し、これらの表面観察の結果とTDSにおける結果を組み合わせ、酸素含有ボロン膜に照射された水素同位体の動的挙動を総合的に評価する予定である。

参考文献 [1] A. Yoshikawa et al., *J. Nucl. Mater.*, accepted

トしている。このことから、 He^+ 前照射することによってボロン膜中に照射欠陥が形成されることがわかった。また、加熱処理後に見られた高エネルギー側のショルダーが He^+ 照射により大きく減少することが分かる。これは、 He^+ 照射によって酸素がスパッタされ、欠陥構造が導入されたことを示すものであり、TDSの結果とも一致している。さらに、SEMによる試料表面観察からも He^+ 照射することによりボロン膜表面の構造が変化することが示唆された。以上のことから、 He^+ 前照射することによって酸素の

金属の損傷組織に及ぼすヘリウムと水素の影響 —陽電子消滅法によるNi中のヘリウムの測定—

京都大学原子炉実験所 徐 虬 義家敏正
九州大学応用力学研究所 渡辺英雄 吉田直亮

1. 目的

核融合炉開発のための技術の発展と共に、金属中のヘリウムの挙動についての研究が盛んになってきた。プラズマ対向材料中のヘリウムは核融合プラズマから材料表面に侵入するものと材料内部で核反応(n, α)により生成したものである。これらのヘリウム原子が中性子照射によって形成された原子空孔と結合し、材料のスエリングを起こし、材料の力学特性が劣化する。金属中のヘリウムを検出するには、昇温脱離ガス分析法(TDS)を用いた方法が最も一般的である。しかし、金属中のヘリウムが非常に安定なので、融点に近くまで加熱しないと脱離しない。また、ヘリウムの検出ができて、どこから放出されたのかがTDSだけで分からない。一方、金属中の欠陥の情報を得るために、陽電子の特性を利用した実験が数多く行われてきた。陽電子寿命測定法から原子空孔の大きさや密度などの情報が得られる。ドップラーブロードニングから消滅相手電子の運動量が分かる。もし消滅相手の電子が内殻電子ならば、核の種類即ち元素の特定もできる。従って、本研究では、陽電子寿命測定と同時に同時計測ドップラーブロードニング測定を行うことにより、金属中のヘリウムの定量的な測定及びヘリウムと欠陥との相互作用を調べることを目的とする。

2. 実験方法

試料は5mm×5mmである。加速エネルギー3.3MeVのヘリウムイオンを用いて照射を行った。照射温度は423Kで、照射量は $9.6 \times 10^{14} \text{He/m}^2$ である。TRIMコードによりヘリウムピークの位置は表面から6 μm で、損傷量とヘリウム量はそれぞれ0.3dpaと300appmである。照射後に50Kおき、一時間の焼鈍を行い、陽電子寿命測定と同時に同時計測ドップラーブロードニング測定を行った。

3. 計算結果と考察

図1にヘリウムイオン照射したNiを、50Kおきに1273Kまで焼鈍した後の陽電子寿命と長寿命成分のIntensityを示している。照射直後にNi長寿命は278.8psで、Intensityは13.6%であった。723Kまで長寿命成分のIntensityはほとんど変わらず、その後に、焼鈍温度の増加と共に減少した。一方、長寿命成分は623Kから823Kまで少し減少したが、873Kから増加した。1123Kに350psに成長した。

図2にヘリウムイオン照射直後Niと1273Kまで焼鈍したNiの未照射Niに対しての比率曲線を示している。また、比較のため、核反応によるヘリウムの形成が無視できる低い照射量で中性子照射したNiの比率曲線も示している。イオンと中性子照射後に、低運動量側に比率曲線の値が1より高かった。これは陽電子が照射により形成された原子空孔集合体中の核外電子と消滅したことである。ヘリウム照射したNi、特に、1273Kで焼鈍した後に、 $13.5 \times 10^{-3} m_0 c$ の付近にピークが現れた。 m_0 と c はそれぞれ電子質量数、真空中の光の速度である。一方、中性子照射したNiの $13.5 \times 10^{-3} m_0 c$ 付近にピークはなかった。このピークは陽電子とヘリウムの核内電子消滅したものと考えられる。1273Kで焼鈍してもヘリウムがまだ原子空孔集合体に安定にトラップされている。本研究では、SとWというパラメーターを導入した。それぞれは低運動量($|P_L| < 4 \times 10^{-3} m_0 c$)と高運動量($11.5 \times 10^{-3} m_0 c < |P_L| < 15.5 \times 10^{-3} m_0 c$)側のカウント数対全体のカウント数の比である。図3にヘリウム照射後と1273Kまで焼鈍中のS-W相関を示している。423Kから523KまでSとWは増加した。これは423K以上で照射によって形成された原子空孔が動けるため、マイクロボイドが形成・成長したと考えられる。しかし、陽電子寿命測定の結果から423Kから523Kまでの温度範囲ではマイクロボイドの形成・成長が分からなかった。焼鈍温度の増加と共に、Sは減少したが、Wは増加した。陽電子寿命測定結果から、Sの減少は873K以下では原子空孔集合体が格子間原子との再結合、873K以上ではマイクロボイドの密度の減少によるものと思われる。また、1273Kまでの焼鈍では、(S, W)点はほぼ同じ直線に乗っていることから、SとWの変化はマイクロボイドのサイズ変化によるものと考えられる。焼鈍温度の増加と共に、Sは未照射Niに近づき、一方、Wは未照射Niから離れることがマイクロボイドにヘリウムが存在することを示している。ヘリウムを含んでいるマイクロボイドは1273Kにおいても安定である。

4. まとめ

本研究では、最近開発された陽電子消滅分光法の新しい実験手法である同時計測ドップラーブロードニング測定を用いて、Ni中のヘリウムの検出及びヘリウムと欠陥との相互作用を調べた。ヘリウムの濃度が低くても、同時計測ドップラーブロードニング法でヘリウムの検出ができる。また、ヘリウムを含んだマイクロボイドは1273Kにおいても安定である。

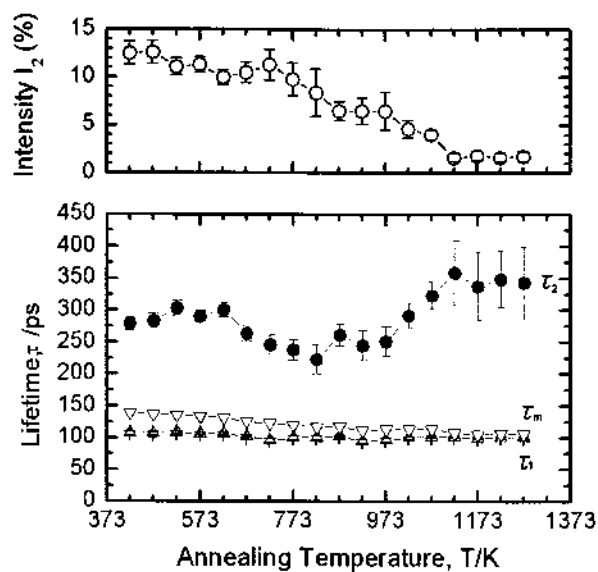


図1 焼鈍中にヘリウムイオン照射した Ni の陽電子寿命と長寿命成分の Intensity の変化

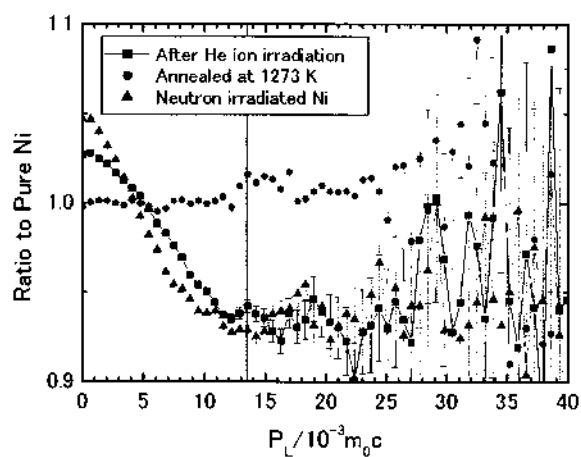


図2 ヘリウムイオン照射直後と 1273K で焼鈍した Ni の比率曲線。比較のため、ヘリウムの形成が無視できる中性子照射した Ni の比率曲線もしめしている

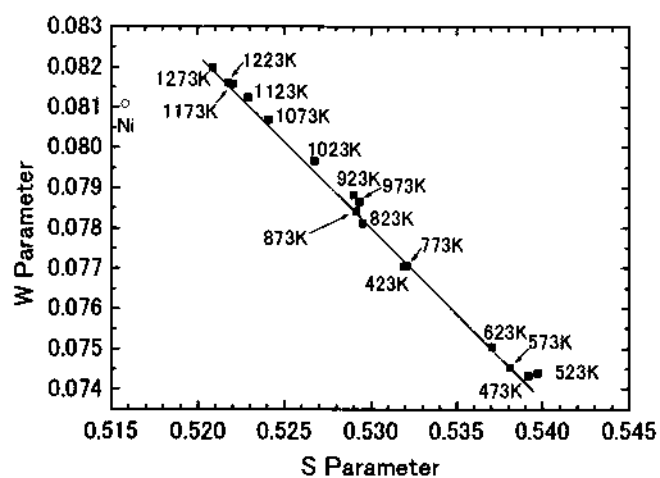


図3 焼鈍中の S と W の相関

1. 目的

金属およびセラミックス中の水素挙動は、材料中に溶解した水素が感受する材料からのポテンシャル場により著しい影響を受けることが知られている。将来の核融合発電および水素エネルギー利用の実現のためには、材料中の欠陥や溶解する不純物(酸素や炭素など)による水素-材料系への影響、および使用環境(水素濃度、温度など)下における材料中の水素挙動を明らかにしていく必要がある。特に水素・酸素溶解による材料の格子膨張は、材料の劣化現象にもつながる重要な問題である。本研究では、微小硬度試験法により $Zr(O)$ の機械的性質に与える水素溶解の影響を調べることを目的とした。

2. 酸素・水素溶解 Zr の機械的性質の評価

Zr 再結晶化圧延平板 (4 mm×25 mm×1 mm) を試料として用いた。また、酸素溶解 $Zr(O)$ 試料は、 Zr 試料を酸素ガス中(973K)で酸化後、高真空中 1073K で 3 週間均一化処理を行うことにより作製し、溶解酸素濃度 (~17 at%) は酸化後試料の重量測定により求めた。これらの試料に加えて、 $Zr(O)$ 試料にガス吸収法により水素を導入し、773K で 3 日間均一化処理を行った試料を作製した。以後、酸素・水素溶解 $Zr(O,H)$ 試料(水素濃度 ~7 at%) と呼ぶ。

微小押込み試験は、九州大学応用力学研究所所有の ENT-1100 (エリオニクス社製) を用いて、室温、試験荷重 10 mN にて実施した。

図 1 は、 $Zr(O)$ 試料のヤング率の格子定数・酸素濃度依存性を示している。酸素を溶解した Zr の格子定数は X 線回折により詳細に調べられており⁽¹⁾、格子定数は本実験で用いた試料の溶解酸素濃度から推定したものである。Northwood らは片持ち梁法により $Zr(O)$ 試料のヤング率を求めており、酸素濃度に依存せずほぼ一定であるとしている⁽²⁾。本実験では Northwood のデータを拡充して広い酸素濃度範囲に亘って $Zr(O)$ のヤング率を測定した。その結果、酸素溶解に伴う格子膨張に伴って緩やかにヤング率が上昇することが分かった。

次に $Zr(O)$ 試料の押込み硬さ H_D の酸素濃度依存性を図 2 に示す。一般的に硬度試験では、試験方法によって硬度の求め方が異なるため、異なった測定により求められた硬度の絶対値の比較は困難である。そこで図中では $Zr(O)$ 試料の押込み硬さ $H_D(Zr(O))$ を Zr のそれ $H_D(Zr)$ で除した値 $H_D(Zr(O))/H_D(Zr)$ で整理し、 Zr - ZrO_2 混合体を焼結し作製した $Zr(O)$ 試料について微小硬度試験を行った Nakatsuka らのデータ⁽³⁾ と比較している。本実験結果の $H_D(Zr(O))/H_D(Zr)$ は、Nakatsuka らのデータに比べて硬度上昇率は低い、その上昇傾向はほぼ同様である。

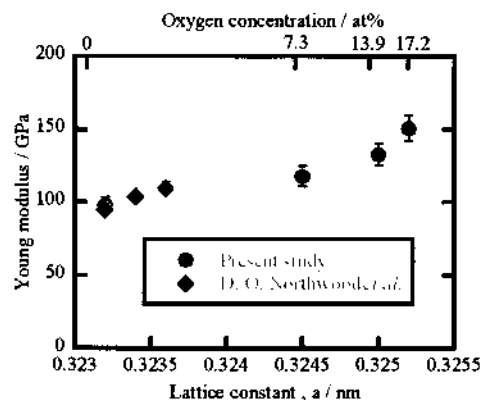


図 1 $Zr(O)$ 試料のヤング率の格子定数・酸素濃度依存性

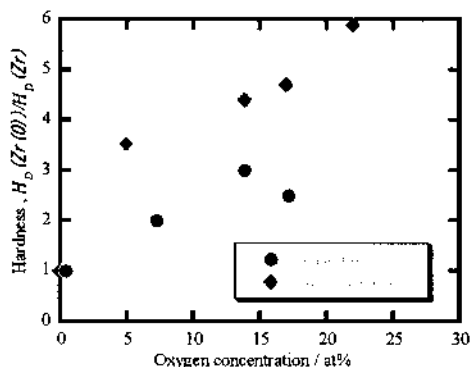


図 2 $Zr(O)$ 試料の押込み硬さの酸素濃度依存性

すなわち、5~7 at%の溶解酸素濃度で硬さ増加が著しく、それ以上の酸素濃度領域では押込み硬さの増加は緩やかであった。図1で示したように、ヤング率は溶解酸素濃度に伴って徐々に増加していることから、弾性および塑性変形の総合的な変形抵抗を表す押込み硬さが酸素溶解により急激に増加するのは、塑性変形の寄与が増加する事によると考えられる。これは、Zr(O)が $\sim 673\text{K}$ より低温では、必ずしも単一相でなく、8面体位置に侵入した酸素原子の規則相(α'' 相)が析出する⁽⁴⁾ことに起因している可能性がある。つまり、 α'' 相の析出により α 相の塑性変形が妨げられることを示唆するものと考えられる。

図3は、Zr(O,H)試料の押込み硬さの水素濃度依存性を示している。酸素を溶解しなかったZr試料および17 at%Zr(O)試料については、水素溶解の影響は殆ど見られなかった。しかしながら、7 at%Zr(O)試料については、水素溶解に伴って17 at%Zr(O)試料とほぼ同程度にまで硬さが上昇した。また、ヤング率はほぼ硬さと同様の傾向を示した。これら10 at%程度の酸素濃度であるZr(O)への水素溶解による硬さ・ヤング率への影響には、次の2つが考えられる。すなわち、水素溶解による格子膨張および溶解酸素の規則化(α'' 相析出)促進の寄与である。しかしながら、これらの影響を明確化するには、高温X線回折実験によるZr(O,H)試料の格子定数変化測定および温度を変えて α 単一相領域における微小硬度試験を行う必要がある。

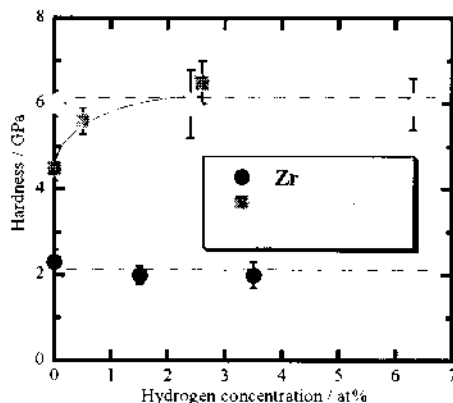


図3 Zr(O,H)試料の押込み硬さの溶解水素濃度依存性

参考文献

- (1) T. Tanabe *et al.*, Surf. Sci., 187 (1987) 499.
- (2) D. O. Northwood *et al.*, J. Nucl. Mater., 89 (1980) 147.
- (3) M. Nakatsuka *et al.*, J. Sci. Technol., 35 (2005) 344.
- (4) T. Arai *et al.*, J. Less-Common Metals, 44 (1976) 291.

3. 研究成果報告

Tritium diffusion in zirconium –effect of recrystallization, impurity oxygen and hydrogen solution, T. Hirano, Y. Saruwatari, K. Hashizume, T. Otsuka, T. Tanabe, E-MRS, 2006年6月, Nice, France

ナノインデンテーション(NI)法を用いた酸素固溶ジルコニウムの機械的性質の評価, 山崎弘志, 大塚哲平, 橋爪健一, 田辺哲朗, 日本原子力学会九州支部, 2006年11月

タングステン中の水素拡散・捕捉挙動に及ぼすヘリウムイオン同時照射の効果

大阪大学 大学院工学研究科 上田良夫

・目的

タングステン中の水素の拡散・捕捉挙動は、タングステンプラズマ対向材料の水素吸蔵、水素透過、水素脆化（ブリストリング等も含む）と密接な関係を持ち、そのメカニズムや、タングステン材料組織の影響を明らかにしておくことは大変に重要である。この目的のため、従来タングステンに水素ビームや水素プラズマを単独で照射する実験や、不純物（ヘリウム、壁材料イオン）を予照射し、その後水素ビームを照射する実験は多く行われている。しかしながら、水素イオンとヘリウムイオンの同時照射実験はほとんどなく、これらのイオンが同時に照射されることによって生じる相乗効果は全くわかっていない。さらに、表面の損耗を伴う条件では、予照射により形成された混合層は、本照射を行う際に、損耗により失われてしまう。

そこで、本研究では、大阪大学の水素イオンとヘリウムイオンのエネルギーを独立に制御して照射できる定常高粒子束複合イオン照射装置（HiFIT）を利用して、水素イオン、ヘリウムイオン、及び壁材料イオン（炭素）を同時照射し、材料中の水素吸蔵量や、水素挙動に影響を及ぼすヘリウムバブルの形成過程、水素の捕捉に伴って生じるブリストリングへの影響を調べる。材料の分析を行うにあたり、応用力学研究所の複合表面分析装置や水素動態観測装置を活用して、水素・ヘリウムの深さ分布やヘリウムバブルの大きさや密度などを測定し、水素・ヘリウム同時照射の影響を詳しく調べる。

・実験方法・結果

平成 18 年度は、水素とヘリウムの同時照射を行ったタングステン試料に対して、水素の深さ方向の密度分布を SIMS で測定して、ヘリウムイオンの照射が水素の拡散に及ぼす影響を調べることを試みた。しかしながら、SIMS に一部不具合があったため、本測定は来年度以降の課題とする。ここでは、タングステンに水素とヘリウム、および炭素を同時照射した試料に対して生じるブリストリングの特性や水素吸蔵に及ぼす影響を示し、水素の拡散に及ぼすヘリウムの影響について考察する。

図 1 に 1keV の水素ビーム（エネルギー成分、1/3E: ~75%、1/2E: ~5%、E: ~10%）に、炭素を約 0.8% 混入させたイオンビームで、タングステン試料を照射した場合の表面状態の変化を示した。照射イオンフルエンスは $7.5 \times 10^{24} \text{ m}^{-2}$ で、タングステン焼結圧延材（アライドマテリアル製）である。イオンビーム中にヘリウムが混入されていない場合は、どの試料温度においてもブリストリングが顕著に発生している。水素によるブリストリングは、水素が飛程を越えて内部に拡散し、

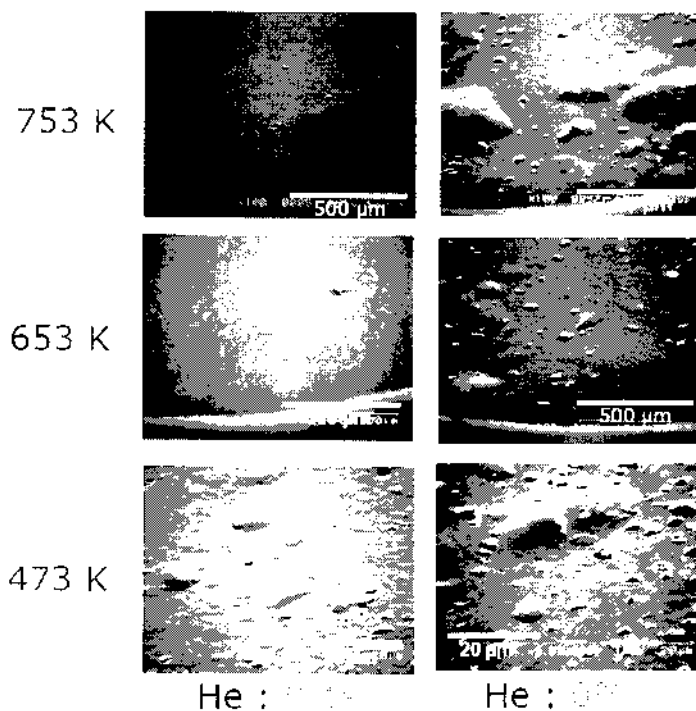


図1 水素・炭素混合イオンビーム照射による W のブリストリング

粒界への蓄積によりその結合力を弱め、同時に粒内の転位、点欠陥、点欠陥の集合体などに吸蔵されることで内部応力を生じて、表面がドーム状に盛り上がったたり、結晶粒が逆断層の様に上部にすべり上がったことを示している。

しかしながら、ヘリウムをわずか0.1%加えただけで、表面の状況は一変しブリストリングが大幅に減少する。先に述べたように、水素が飛程を越えて拡散することがブリストリングの基本的なメカニズムであるため、ヘリウムを同時入射することにより、水素の内部への拡散が抑制されていることが示唆される。この抑制メカニズムについては、今後研究を進めて解明していく必要があるが、ヘリウムバブルの形成によって、水素の拡散が阻害されることや水素の捕捉サイトが増加して表面付近に吸蔵される水素のリテンションが増加したこと等が考えられる。そこで、ヘリウム同時照射の水素リテンションに対する影響を調べた

結果を図2に示す。図2は、水素イオンビーム（炭素は0.1%以下）をタングステンへ照射した場合の水素の昇温脱離スペクトルを示している。ヘリウムがない場合と比べ、ヘリウム0.1%がイオンビーム中に存在した場合には、水素吸蔵量が約1/2に減少した。このデータより、ヘリウム入射の効果は、単に水素捕捉サイトの増加による影響とは考えられないことを示唆している。今後さらなる研究が必要であるが、本結果はヘリウムイオン照射によるバブルが、水素の内部拡散を抑制しているという可能性を示唆したものであると考えられる。

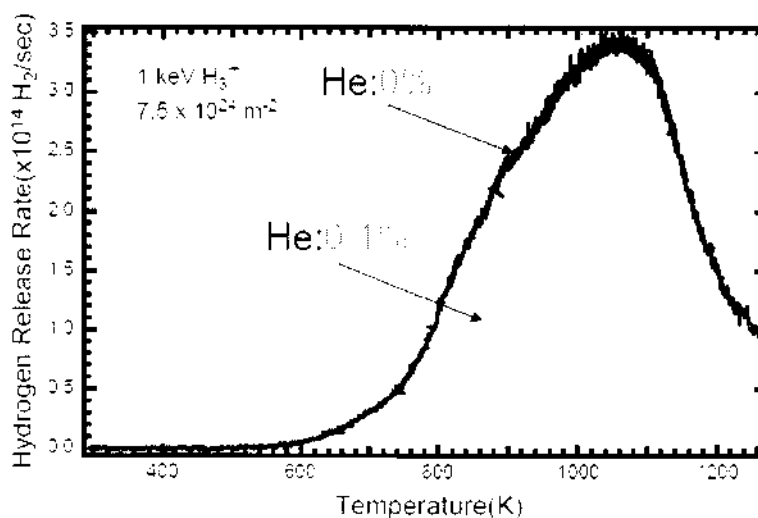


図2 水素イオンビーム照射後のW中の水素吸蔵量

来年度も本特定研究を継続して申請することを予定しているが、その際には水素・ヘリウム同時照射下での表面近傍のヘリウムバブルのTEM観察を行いたいと考えている。

・成果報告

○吉田淳也、福本正勝、養田強平、大塚裕介、上田良夫、「水素・ヘリウム同時照射がタングステンに与える影響」プラズマ核融合学会 第23回年会 30pB07P、2006年11月

・研究組織

上田良夫（大阪大学）	教授	研究代表者
吉田直亮（九州大学）	教授	
徳永和俊（九州大学）	助教授	
栗下裕明（東北大学）	助教授	
福本正勝（大阪大学）	D1	
吉田淳也（大阪大学）	M2	
養田強平（大阪大学）	M2	

オーステナイトおよびフェライト鋼の照射材中におけるヘリウム挙動と粒界偏析

島根大学総合理工学部 小野興太郎

1. 背景と目的

原子炉および核融合炉の炉内構造材料では、中性子による激しい照射損傷に加え、核変換反応によりヘリウムが材料中に蓄積する。ヘリウムは脆化をもたらす、特に溶接補修時には、粒界に蓄積したヘリウムが粒界割れの主要因となる事が指摘されている。その為、適正な溶接補修技術の確立には、ヘリウム共存下での高エネルギーイオン照射による損傷形成過程の十分な理解が求められている。

本研究では、現在使用されている、あるいは今後使用が検討されているオーステナイト鋼やフェライト鋼を試料に用いて、ヘリウム照射下および昇温下での電子顕微鏡その場観察を行い、高温下でのヘリウムバブルの粒界偏析に関する基礎的知見を得ることを目的とした。また、オーステナイト系ステンレス鋼でも、304鋼は316L鋼と比較してヘリウムに起因する割れが起こりにくいといった報告例もあり、各試料におけるヘリウム挙動の比較から、添加元素の効果を明確化し、溶接割れに至るメカニズムについて検討した。

2. 実験方法

SUS316L および SUS304 を厚さ 0.1 mm まで機械研磨した後、3 mmφに打ち抜き、 10^{-6} Pa 程度の高真空中で 620℃、24 時間の焼鈍を行い試料として用いた。焼鈍後、ツイングジェット研磨および電解研磨を施し、電子顕微鏡観察用薄膜試料とした。イオン照射装置直結型の透過型電子顕微鏡を用いて、試料温度 200~800℃で $1 \times 10^{18} \sim 21 \text{ He/m}^2$ の範囲で 20 keV-He⁺ を照射した。照射後、1000℃程度まで昇温し、昇温中のヘリウムの偏析挙動をその場観察した。また、照射および昇温後に FIB 加工したバルク試料を用いてヘリウムバブルの深さ分布を調べた。

3. 結果および考察

ヘリウム照射した試料の昇温中のその場観察の結果、SUS316L では SUS304 と比較して高密度にヘリウムバブルが粒界に蓄積する様子が観察された。特に、800℃以上の高温照射では、結晶粒界に明瞭な違いが観察され、SUS304 ではほとんどのバブルは消滅し観察されないのに対して、SUS316L では依然としてバブルが観察された。図 1 には、両試料に 800℃でヘリウム照射したときの粒界付近の微

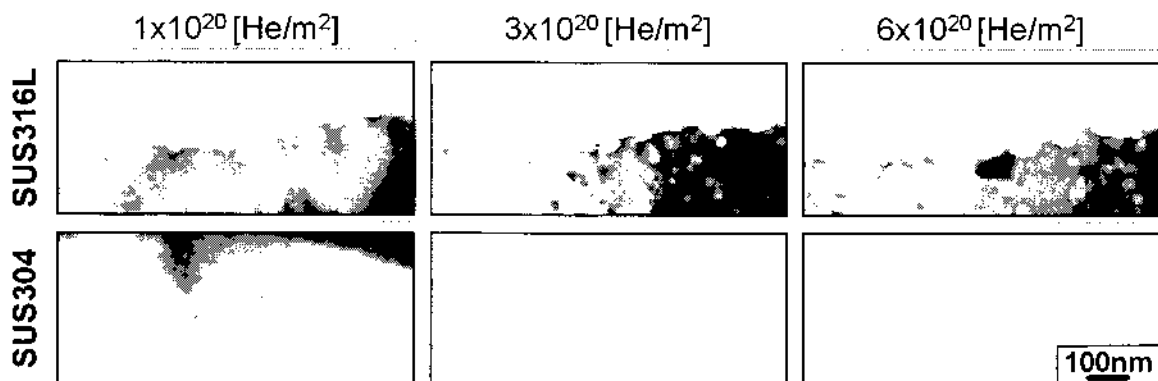


図 1 ヘリウム照射後、昇温した際の粒界付近の微細組織(明視野像)。

細組織の照射量依存性を示す。昨年度の共同実験で、SUS316L 中のヘリウムバブルは、SUS304 よりも移動度が低いことを既に明らかにしており、この相異は、316L の添加元素である Mo がヘリウムバブルを強く捕捉することによることに起因すると考えられる。また、このように粒界に偏析したヘリウムバブルは、粒界拡散を経て相当深部にまで分布していることが明らかになった。図 2 には、200℃で 1×10^{20} He/m² 照射後、900℃まで昇温した SUS316L の FIB 加工による断面微細組織を示す。図には、TRIM-code により算出した 20keV-He⁺ の飛程分布も同時に示している。ヘリウムは、飛程(~100nm)を遙かに超えて、最大 1μm 程度にまで分布していることが確認された。これは、低エネルギーヘリウムの照射であっても、その影響が表面近傍にとどまることなく、バルクとしての特性にも影響を与えることを示している。

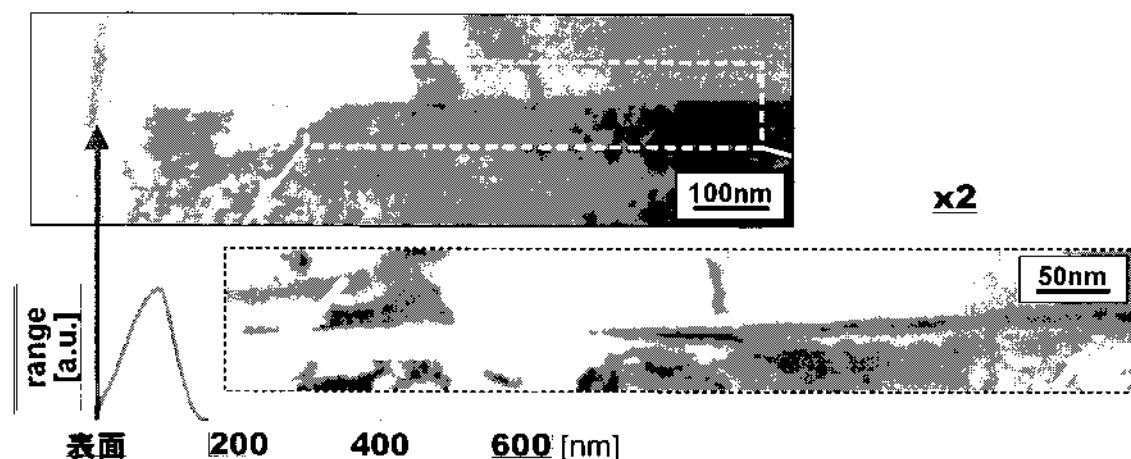


図 2 20keV-He⁺を 200℃で 1×10^{20} He/m² 照射後、900℃まで昇温した SUS316L の断面微細組織(FIB, 明視野像), および, TRIM-code による 20keV-He⁺の飛程。

今後は、ヘリウム共存下での重イオン照射実験や、ヘリウム・重イオンの同時照射実験を行い、中性子照射環境下を模擬した He/dpa レベルでの照射材中の欠陥形成過程を調べる予定である。さらに、フェライト鋼 Fe-Cr-W 等についても照射実験を行い、ヘリウム共存下での応力腐食割れに関連したモデルの構築を目指す予定である。

● 研究成果報告

- ・ 小野興太郎, 「ステンレス鋼中のヘリウムの挙動」 平成 18 年度九州大学応用力学研究所研究集会, 福岡, 6 月
- ・ 宮本光貴, 小野興太郎, 「カスケード損傷形成下における He バブルの動的挙動」 平成 18 年度九州大学応用力学研究所研究集会, 福岡, 6 月
- ・ 宮本光貴, 小野興太郎, 荒河一渡, 吉田直亮, 「オーステナイトステンレス鋼におけるヘリウムの挙動と粒界偏析」 日本金属学会 2006 年秋期大会, 東京, 9 月

● 研究組織

研究代表者： 小野興太郎 島根大学総合理工学部 教授
 所内世話人： 吉田 直亮 九州大学応用力学研究所 教授
 研究協力者： 宮本 光貴, 卜部 洋史 (島根大学総合理工学部)
 渡辺 英雄, 岩切 宏友, 時谷 政行, 隅野 裕也 (九州大学応用力学研究所)

低温高密度ヘリウムプラズマと熱パルス重畳照射による タングステン材料損耗に関する研究

研究代表者 名古屋大学エコトピア科学研究所 大野哲靖

1. はじめに

核融合装置のプラズマ対向材料として、タングステンが耐熱性、低水素リテンションなどの優れた特性により有望視されている。国際熱核融合実験炉計画(ITER)においても、タングステン材の採用が検討されている。しかし、スパッタリング閾値エネルギー以下のヘリウムイオン照射においても、高融点金属表面にヘリウムバブルが形成されることが実験的に明らかになり、その形成機構の解明、抑制方法の調査が行われてきた。

名古屋大学の直線型ダイバータ・プラズマ模擬試験装置 NAGDIS-II は定常高密度プラズマを生成することが可能であり、核融合装置の条件に近い高粒子束プラズマ照射を行うことができる。これまでに、低エネルギー高粒子束ヘリウム照射による多孔構造の形成が観測されている (Fig. 1)。

本研究ではレーザー照射により熱パルスを重畳することにより、トカマク装置における ELM 等のパルスの熱負荷環境を模擬し、今後磁場閉じ込め核融合、慣性閉じ込め核融合研究にわたり本質的な課題となるヘリウムプラズマと熱パルス重畳照射によるタングステンの損耗過程を明らかにすることを目的としている。

Table 1 は慣性核融合研究、磁場閉じ込め核融合研究で現れる典型的なパルスの熱負荷の特性を表している。今回 Ruby レーザーと YAG レーザーを用いて熱パルスを模擬して実験を行った。実験配置を Fig. 2 に示す。

2. 実験結果の概要

ヘリウムプラズマと Nd:YAG レーザー重畳照射

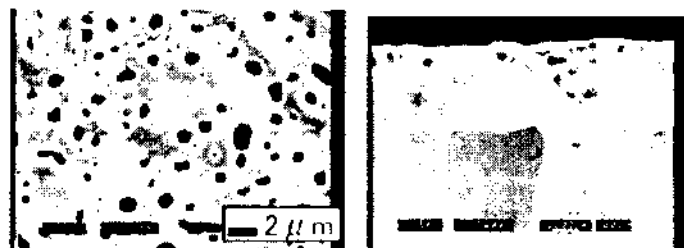


Fig. 1 高密度ヘリウムプラズマ照射によるヘリウムバブル・ホール
の形成(右図:表面, 左図:断面) (J. Nucl. Mater. 313-316(2003))

Table. 1 パルスの熱負荷の特性

	transient heat load	time duration
ITER)		
ELM	$\sim 1 \text{ MJm}^{-2}$	0.1-1 ms
disruption	$\sim 10 \text{ MJm}^{-2}$	1-10 ms
laser fusion)		
x-ray	$\sim 500 \text{ Jm}^{-2}$	$\sim 1 \text{ ns}$
burn ion	$\sim 10 \text{ kJm}^{-2}$	$\sim \text{several } \mu\text{s}$

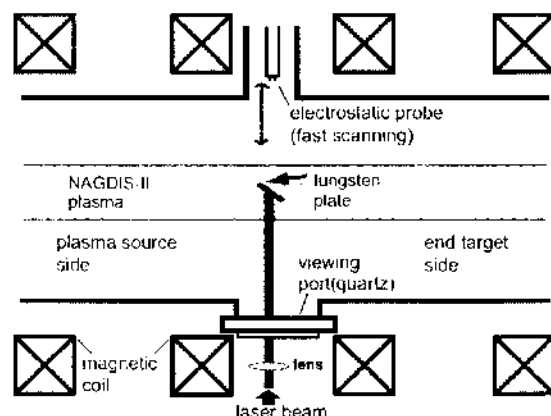


Fig. 2 実験配置

実験結果を Fig. 3 に示す。ヘリウムプラズマ照射のみの場合 (Fig. 3(a)) に比べて、重畳照射により著しくタングステンの損傷が進行していることが分かる (Fig. 3(b))。レーザー照射のみ、及びヘリウムプラズマ照射後にレーザー照射した場合についても実験を行ったが、Fig. 3(b)に見られるような著しい損傷は観測されなかった。これは、ヘリウムバブルの形成に伴い表層の熱伝導が低下した領域の温度が、レーザー照射により高温となりバブル上部が融解し、ホールが形成され、そのホール内にヘリウムプラズマ進入しホール下部面にもバブルが形成され損傷が進行していると考えられる。レーザー照射による高温領域の発生は、ホールの形成を考慮した3次元の熱伝導解析によっても再現されている。

一方 YAG レーザーのパルス幅は 5ns 程度であり、ELM の模擬には適さない。そのため Q スイッチを外した Ruby レーザーを用いてパルス幅約 1ms の熱パルスを模擬した。Fig. 4 より、レーザー強度を上げると、Fig. 3 とは逆にホールの形成が少なくなっていることが分かる。これはパルス幅が長い間熱伝導により全体がゆっくり加熱されるため、アニーリングの効果によりホールが消失したと考えられる。

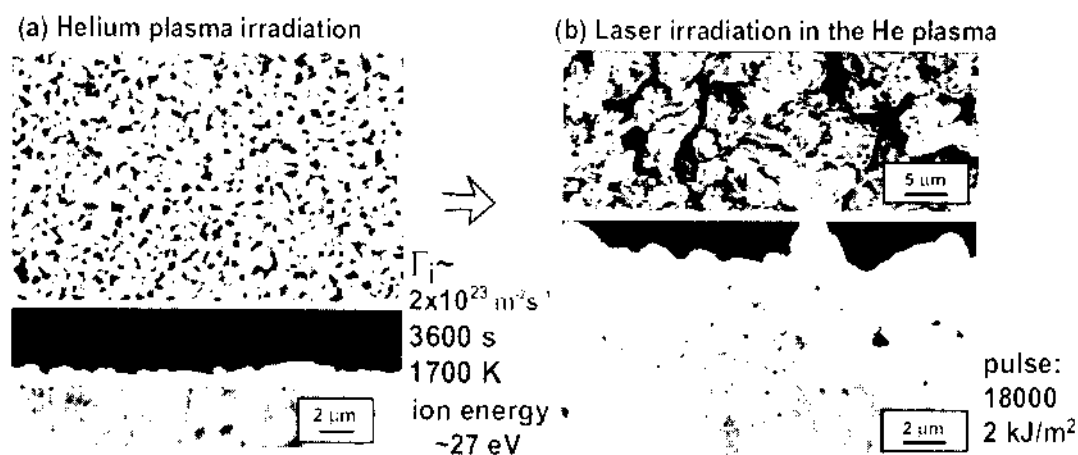


Fig 3 Nd: YAG レーザー照射とヘリウムプラズマ重畳照射によるタングステン表面構造の変化。(a)ヘリウムプラズマ照射のみ、(b)ヘリウムプラズマとレーザー光同時照射

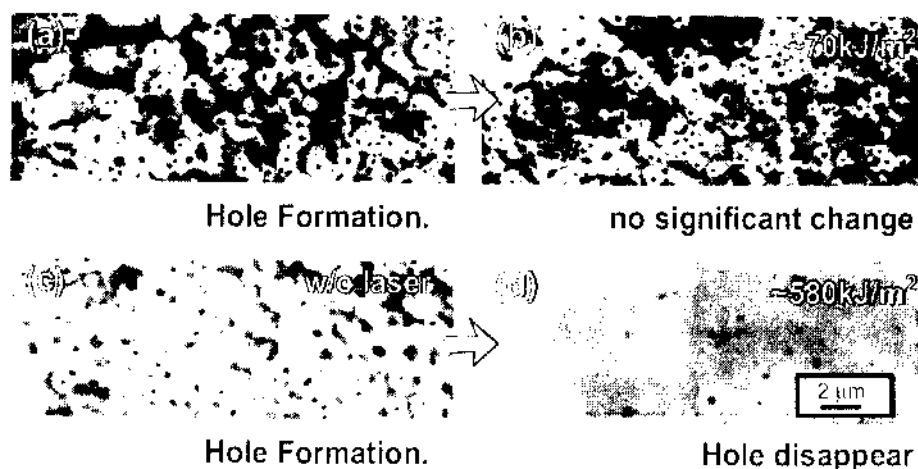


Fig 4 ルービーレーザーとヘリウムプラズマ重畳照射によるタングステン表面構造の変化

軸対称イオン感受プローブによるイオン温度と流れの測定

横浜国立大学大学院工学研究院 津島 晴

・目的

イオンの温度と流速を同時に計測できる新しいプローブ法の開発し、小型 PWI 実験装置で測定する。

・測定原理とその解析

軸対称イオン感受プローブとは、イオンのラーマー半径が電子のラーマー半径と比べてかなり大きいという性質を利用するイオン感受プローブを発展させたもので、その構造は、図 1 のように二枚の円盤状の電極が狭い間隔で向き合い、その間から侵入してくるイオンを測定するものである。またその名称の「軸対称」は形状の対称性を意味している。イオンの温度は二枚の電極に与えた電圧と電流の関係から得られ、イオンの流速は二枚の電極に流れる非対称性から得られる。したがって、その特性は図 1 に示す D 、 L 、 δ 、 σ などによるので、目標となるプラズマに合わせイオン軌道計算をする必要がある。図 2 はその計算結果の一部で、磁場に対して水平方向の速度と垂直方向の速度に対して、どのような電極へ衝突断面積（捕集効率）があるのか計算したものである。この場合のイオン感受プローブの大きさをイオンの実効的なラーマー半径 $\rho_0 = (mk_B T_i)^{1/2} / (eB)$ で規格化すると $D/\rho_0 = 20$ 、 $L/\rho_0 = 2.0$ 、 $\delta/\rho_0 = 1.0$ 、 $\sigma/\rho_0 = 0.5$ である。また、図中の速度は音速 $(2k_B T_i/m)^{1/2}$ で、等高線の数値として表されている断面積は ρ_0^2 で規格化されたものである。

・実験

予備段階として、横浜国大にある YDPD 装置でのプラズマ ($\sim 10^{11} \text{cm}^{-3}$) を用いた試験でイオン温度 ($\sim 1 \text{eV}$) とプラズマの流速 ($v/c_s < 0.3$) の測定が可能であることを確認した。

・まとめ

軸対称プローブの解析を行い横浜国大で予備実験を行った。小型 PWI 実験装置での測定には至っていないが、今後行う予定である。

・研究組織

代表者	津島晴	横浜国立大学大学院工学研究院 助教授
	庄司多津男	名古屋大学大学院工学研究科 助教授
所内責任者	坂本瑞樹	応用力学研究所 助教授

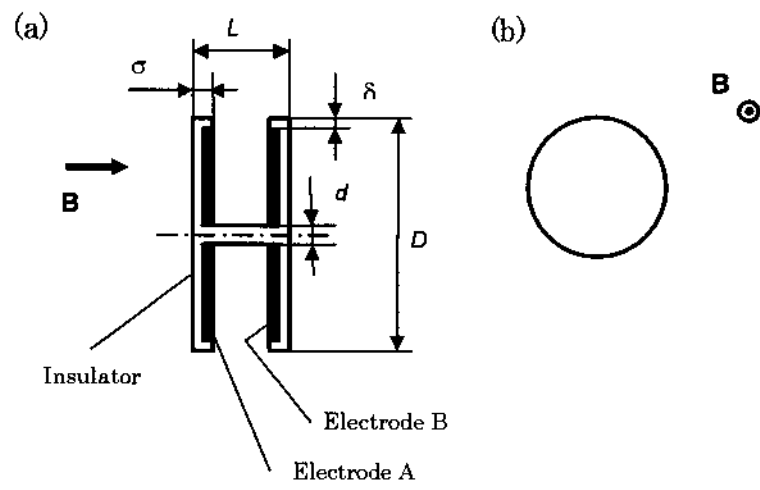


図1 軸対称イオン感受プローブ概略図。

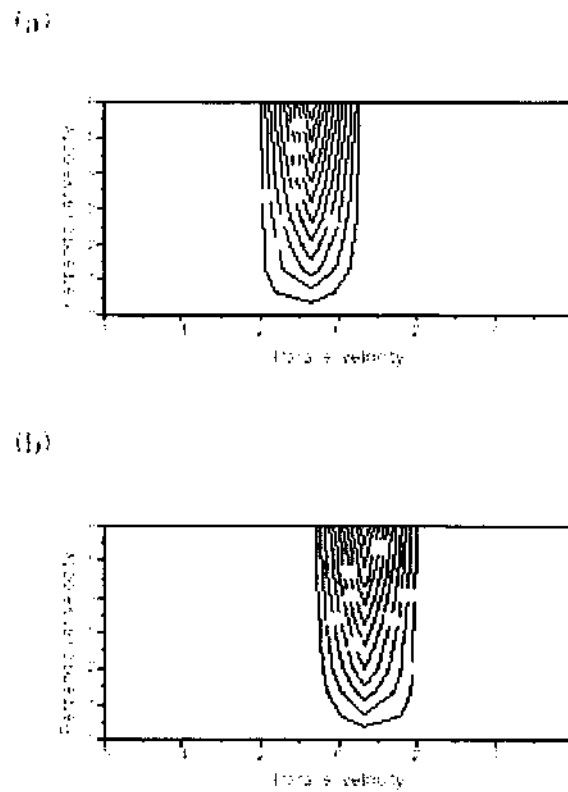


図2 (a) 電極 A、および(b) 電極 B への磁場に対して平行な速度成分と垂直な速度成分に対する衝突断面積。

転位ループの動的挙動に対する溶質原子の効果

大阪大学超高压電子顕微鏡センター 荒河一渡

目的

格子間原子の集合体の動的挙動は、D-T 核融合による中性子照射下での材料中の微細構造発達過程において重要な役割を果たすことが知られている。我々はこれまでに、高エネルギー電子照射によって純 Fe 中に形成される二種類の格子間原子型転位ループ (Burgers ベクトル $b=1/2\langle 111 \rangle$ のループと $b=\langle 100 \rangle$ のループ) の動的挙動を調べ、両種類のループともに Burgers ベクトル方向に一次元移動し得ること、 $b=1/2\langle 111 \rangle$ のループの一次元移動の頻度は $b=\langle 100 \rangle$ のループのそれより極めて高いことなどを明らかにしてきた。

本研究では、核融合炉構造材料の候補である Fe-Cr 合金のうち、Fe-Cr モデル合金を実験対象とし、純 Fe (純度 99.998 %) および Fe-0.1at.%Cr, Fe-3 at.% Cr, Fe-9at.%Cr, Fe-15at. % Cr 合金におけるループの動的挙動を TEM その場観察法により系統的に調べ、Fe 中のループの移動過程に Cr が及ぼす効果を抽出することを目的としている。

昨年度来、ループを導入した試料を電子顕微鏡内で段階的に加熱—その場観察することで、ループの熱活性化挙動を調べている。その結果の一部は、昨年度の報告書に記載した。一方、純 Fe の超高压電子顕微鏡内での高エネルギー電子照射下では、ループは、熱的には移動しないような温度においても容易に移動し得ることがわかっている。本報告では、Fe-Cr 合金の高エネルギー電子照射下における $1/2\langle 111 \rangle$ ループの移動過程について調べた結果を述べる。

実験方法

大阪大学超高压電子顕微鏡センターに付随する超高压電子顕微鏡 H-3000 (Hitachi) を用いて各 TEM 用薄膜試料に高エネルギー電子照射を行い、直径数ナノメートルの微小ループを導入した。また、同時にループの移動の過程を観察・記録した。ここで、電子加速電圧は 1000 kV、照射強度は $1 \times 10^{24} \text{ e}^-/\text{m}^2\text{s}$ 、照射温度は 110–470 K とした。

実験結果および考察

すべての試料において、 $1/2\langle 111 \rangle$ ループは高エネルギー電子照射によって間歇的なジャンプを示した。

ここで、 $1/2\langle 111 \rangle$ ループ一個あたりのジャンプ頻度 (1s 当たりのジャンプ回数) を定量化した。この作業において、ループには Burgers ベクトルの種類において二種類存在することを考慮するために、両種類のループの数密度の比率測定を別途行った。FIG 1 はジャンプ頻度を照射温度に対してプロットしたものである。また、FIG 2 は、全ループ密度が照射温度の関数となっていることを考慮して、ジャンプ頻度を全ループ密度へプロットし直したものである。現在のところ高エネルギー電子照射によるループの移動の詳細な機構はわかっていないが、ループの移動に熱活性化過程が効くと考えても (FIG 1)、あるいはループの密度といった周りの環境が効くのだとしても (FIG 2)、いずれにしても純 Fe 中のループのジャンプ頻度は Fe-Cr 合金のそれよりも高い値を示している。このことは、分散した Cr 原子によるループ移動に対する摩擦抵抗がいずれの合金濃度においても無視できないものであることを示す。

一方、FIG 3 は、ループのジャンプの距離を全ループ密度に対してプロットしたものである。純 Fe において特に顕著に、ジャンプ距離がループ密度にほぼ反比例して減少する関数となっていることがわかる。このことは、ループのジャンプ距離は不純物原子や溶質原子そのものによってではなく周りに存在するループによって制限付けられていることを示

唆する。

今回、 $1/2\langle 111 \rangle$ ループのジャンプ頻度において、純FeとFe-Cr合金との間で明確な違いが見られた。一方、Fe-Cr合金の中では、Cr濃度による顕著な系統的な違いは検出できなかった。ループの移動に対する摩擦抵抗がCr濃度によらないのだとするとこれは大変興味深い。このことは、今後、より精確な実験によって検証していく必要があると思われる。

研究組織

代表者：大阪大学超高压電子顕微鏡センター 荒河一渡

協力者：大阪大学超高压電子顕微鏡センター 森博太郎

所内世話人：九州大学応用力学研究所 宮本好雄

所内世話人：九州大学応用力学研究所 吉田直亮

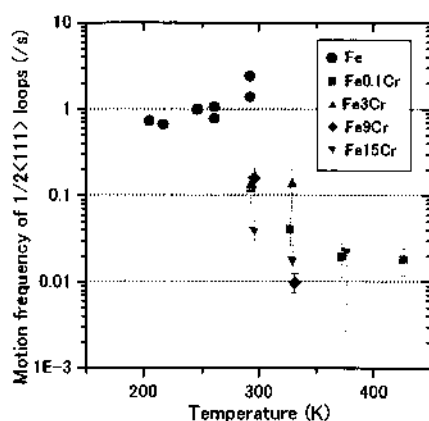


FIG. 1. Temperature dependence of jump frequency of $1/2\langle 111 \rangle$ loops upon high-energy electron irradiation. (1000 keV, $1 \times 10^{24} \text{ e}^-/\text{m}^2\text{s}$)

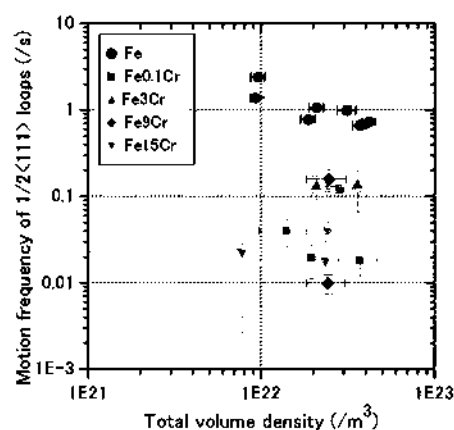


FIG. 2. Loop-density dependence of jump frequency of $1/2\langle 111 \rangle$ loops upon high-energy electron irradiation. (1000 keV, $1 \times 10^{24} \text{ e}^-/\text{m}^2\text{s}$)

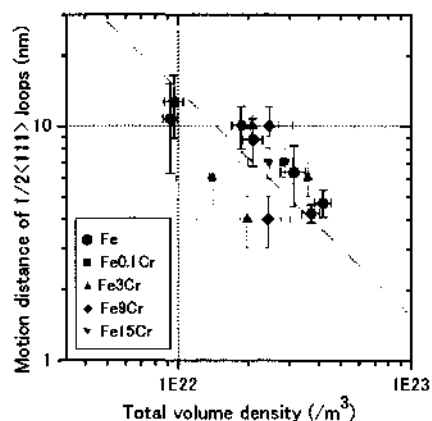


FIG. 3. Loop-density dependence of jump distance of $1/2\langle 111 \rangle$ loops upon high-energy electron irradiation. (1000 keV, $1 \times 10^{24} \text{ e}^-/\text{m}^2\text{s}$)

1. 目的

核融合炉ブランケット構造材として期待されるバナジウム合金と低放射化フェライト鋼はブランケット増殖材、冷却材との相互作用により様々な変化を起こす。本研究で対象とする液体リチウムブランケットに関しては、リチウム環境において構造材との間でN, O, C不純物の移動が起こることが知られている。不純物の移行は材料の腐食特性だけでなく強度特性にも影響を与える。本研究の目的は、液体リチウム環境に曝されたバナジウム合金および低放射化フェライト鋼の微細組織、組成の変化を、透過電子顕微鏡等により詳細観察することにより、浸入不純物、腐食生成物の内部組織および強度特性への影響を明らかにすることを目的とする。特に組織変化と硬度、引っ張り特性など強度特性との相関に重点を置く。

2. 実験方法

核融合科学研究所およびオークリッジ国立研究所において、V-4Cr-4Ti 合金 (NIFS-HEAT2) 及び低放射化フェライト鋼 (JLF-1) 試料を液体リチウムに高温で長時間曝した。これらについて断面方向の硬さ分布、組成分布を硬度計、SEM-EDS によって求めるとともに、応用力学研究所のFIB装置等で薄膜化し透過電子顕微鏡によって組織、組成変化およびその深さ依存性を求めた。

3. 実験結果

図1は、V-4Cr-4Ti を液体リチウムに浸漬したときの浸漬時間とN, O, C不純物量の関係を示す。高温浸漬により、N, Cが増加し、Oが減少することが分かる。

図2は、浸漬による析出の変化を透過電子顕微鏡で調べたものである。標準熱処理を施したV-4Cr-4Ti合金は、C, Nを多く含むTiの粗大析出物(Ti-C-N)とTi-C-Oからなる微細な析出物の2種類が観察される。Li浸漬により、Ti-C-O微細析出が選択的に再溶解することが、図3に示されている。これは、リチウム浸漬によりマトリクス中の酸素が溶出し酸素濃度が低下し、それに伴い酸素との化合物であるTi-C-O微細析出が不安定化したためと考えられる。

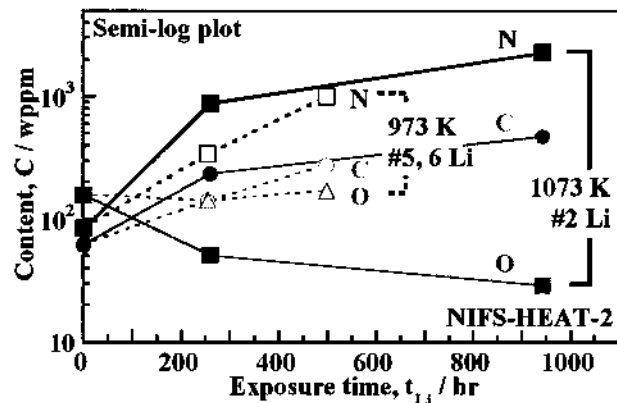


図1 V-4Cr-4Ti の液体リチウム浸漬によるN, O, C不純物濃度の変化。0.25mm厚クーポン試験片を利用

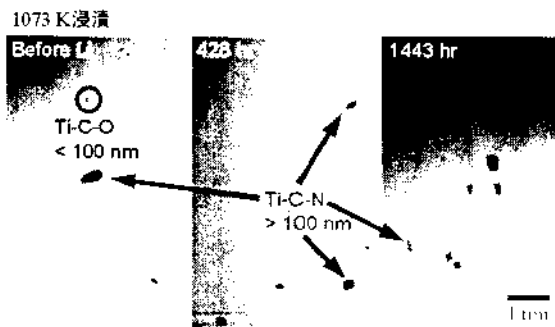


図2 V-4Cr-4Ti のリチウム浸漬による析出分布の変化。0.25mm厚試験片の中心部分を観察した。(1073K 浸漬)

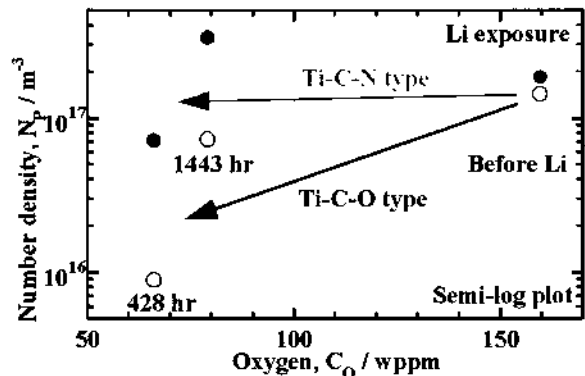


図3 試料酸素濃度と析出密度との関係 (1073K 浸漬)

これらの浸漬による引っ張り特性変化を図4に示す。図1で示すようにC, Nの大幅な増加が起こったにもかかわらず、硬化は起こらず若干の軟化傾向を見せている。これは、C, Nの増加はTi-C-N粗大析出物が吸収することにより、特性変化に大きな影響を与えないが、Oの減少はTi-C-O析出の分解を引き起こすため、強度低下をも

たらすと考えられる。浸漬による延びの低下も認められたが、長時間試験後も10%程度の一様伸びを保っている。

図5は低放射化フェライト鋼JLF-1を液体リチウム浸漬した後断面をSEM観察したものである。表面から20 μ mほどまで、マルテンサイト相が失われていることが分かる。分析の結果、JLF-1では、バナジウム合金とは逆にC濃度が低下することが分かった。Cの濃度の低下によりマルテンサイト相がフェライト層に戻ったものと考えられる。左上の写真は表面近傍の透過電子顕微鏡組織を示したもので、明確にフェライト相とマルテンサイト相の分離が観察された。

深さ方向の硬度測定の結果、表面近傍では、ビッカース硬度が250から130程度まで低下していた。この値はFe-Crフェライト相の値に近く、C溶出による相変化に対応して軟化が起こったことが分かる。

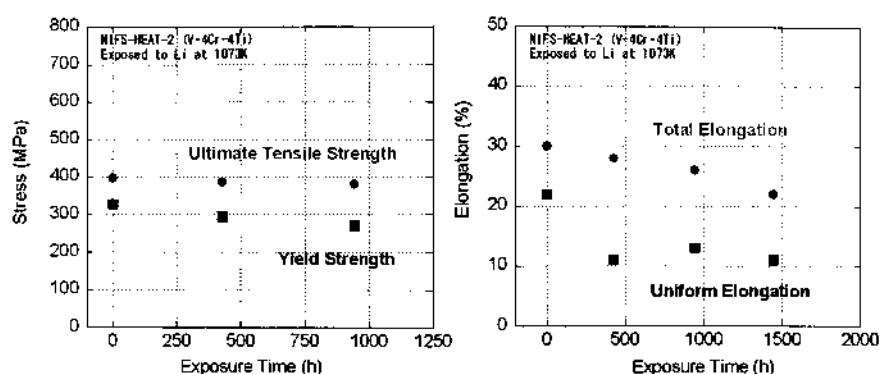


図4 V-4Cr-4Tiのリチウム浸漬後の引っ張り特性 (0.25mm厚試料)

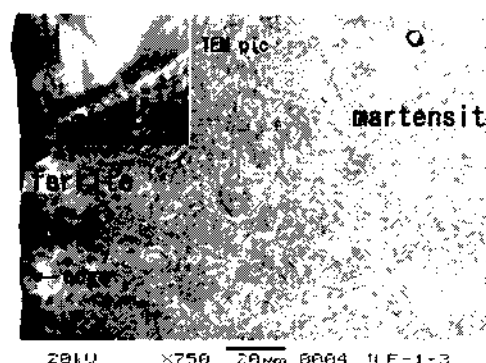


図5 JLF-1のリチウム浸漬後の断面SEM像 (左上は表面近傍のTEM像)

4. まとめ

液体リチウム浸漬によるC, N, Oの移行とその効果は、材料、温度、Liの純度によって大きく異なる。バナジウム合金に関しては、Oの流出により、析出強化機構が失われることが、低放射化フェライト鋼においては、Cの流出により、マルテンサイト強化機構が失われることが課題として明らかになった。

5. 研究組織

室賀健夫、長坂琢也、田中照也
徐 祺
吉田直亮、渡辺英雄

(核融合科学研究所)
(総合研究大学院大学)
(九州大学応用力学研究所)

6. 発表論文

- (1) T. Nagasaka, T. Muroga, K. Fukumoto, H. Watanabe, M. L. Grossbeck and J. Chen "Development of fabrication technology for low activation vanadium alloys as fusion blanket structural materials" Nucl. Fusion 46 No 5 (May 2006) 618-625
- (2) T. Nagasaka, T. Muroga, M. Li, D. T. Hoelzer, S. J. Zinkle, M. L. Grossbeck and H. Matsui "Tensile property of low activation vanadium alloy after liquid lithium exposure" Fusion Engineering and Design, 81 (2006) 307-313
- (3) Q. Xu, T. Nagasaka, T. Muroga "Compatibility of low activation ferritic steels with liquid lithium" 17th Topical Meeting on the Technology of Fusion Energy (November, 2006 Albuquerque)

(財)電力中央研究所 秀 耕一郎、宮原 勇一
九州大学 応用力学研究所 渡辺 英雄

1. 目的

原子炉等の炉内構造物材料として用いられるオーステナイト系ステンレス鋼は、軽水炉温度で大量の中性子照射を受けることにより、応力腐食割れ(SCC:Stress Corrosion Cracking)感受性を生じる場合がある。この現象は本来 SCC感受性を有しない母材部(溶体化材)に生じるため、照射誘起応力腐食割れ(IASCC:Irradiate Assisted Stress Corrosion Cracking)と呼ばれ、高経年化した軽水炉や核融合炉の冷却配管等において問題となる可能性がある。秀ら^[1,2]はこれまでに304系ステンレス鋼の溶体化材と熱鋭敏化材についてIASCC感受性の指標となる粒界割れ破面率の中性子照射量依存性を調べてきた。その結果、粒界割れ破面率は、熱鋭敏化材では照射量 $1 \times 10^{20} \text{ n/m}^2$ までは増加するものの、 $3 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$ では未照射状態よりも低下すること、一方で溶体化材は $3 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$ まで増加すること明らかにし、この鋼種間の違いは、マクロ変形挙動の違いに起因している可能性について報告した。しかしながらこのマクロ変形挙動に差異を与える微小領域の変形挙動については解明されるに至っていない。

このため本研究では、結晶粒の微小領域の変形挙動を明らかにすることを目的として、ナノインデントとEBSPを用いて結晶粒内の変形能の解明を行っている。これまでの研究^[3,4,5]から、室温引張を行った試料では①変形が進むと結晶粒内に、粒界と同程度の硬さのピークが現れてくること、②また変形が進むと結晶性の乱れた領域が粒内に現れてくることを確認した。また、重イオン照射材については、③0.6dpa照射材には結晶性の乱れは認められ、6dpa照射材については結晶性の乱れている部分が現れ、④その状態は室温引張の600MPa変形材の状態に近いこと、を報告した。これらの結果を受けて、本報告ではEBSPを用いて材料中の歪の分布を測定することにより、結晶の変形能について検討を行った。

2. 実験方法

2.1 供試材と照射条件

供試材は通常の商用純度材で、C濃度は比較的高めの304ステンレス鋼の熱鋭敏化材とした。化学組成および熱鋭敏化条件を表1に示す。重イオン照射を行う試料は3mmφ×200μmのTEMディスクの形状とし、照射面については5%過塩素酸-95%酢酸溶液中で40Vで電解研磨を実施した。

重イオン照射は400℃で、0.06、0.6、6dpaまで実施した。それぞれの照射量を中性子照射量に換算すると、約 3×10^{23} 、 1×10^{25} 、 $1 \times 10^{26} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$ となる。

2.2 EBSP測定

EBSP測定はTEM観察に不可欠なセクショニング、バックシンニングを実施しない状態で照射面側を行った。これはダメージピーク位置の歪がセクショニングとバックシンニングにより解放される可能性を考慮したためである。測定は各試料の異なる位置を3箇所について実施した。今回測定したKernel Average Misorientation (KAM)は、各結晶粒内の隣接する測定点間の結晶方位差を測定領域内で平均化したものである。

3. 実験結果と考察

重イオン照射材のEBSP測定結果の代表例を図1に示す。この図で、Inverse Pole Figure(IPF)は測定される結晶方位、KAMは上記のミスオリエンテーションである。はじめに、IPF像をみると、照射量が増加しても結晶性の乱れはほとんどみられない。前報^[5]では照射が進むと粒界と粒内の一部に結晶方位関係が崩れ、像の乱れる部分のあることを報告したが、今回は異なる結果となった。これは今回EBSP装置の菊池線撮影カメラを更新したことにより、解像度が向上し、見た目の違いとなって現れた可能性もあるが、今後さらに検討する必要がある。KAM像については各照射量でほとんど同じであり、IPF像の結果と同じであった。

室温引張変形させた試料のEBSP測定結果を図2に示す。ここで用いた試料は以前の報告^[4]のもので、変形量は中

性子照射材の0.2%耐力を基に決めており、270MPaは 3×10^{23} n/m² (E>1MeV)、600MPaは 3×10^{25} n/m² (E>1MeV) 相当材である。この図では色が濃くなるほど歪による結晶方位差が大きいことを示しており、粒界近傍と粒内の一部に大きな歪の領域が認められた。特に歪の大きな部分は粒界に集中しており、一方で粒内にも不規則に歪の大きな領域が観察され、変形量が大きくなるについてその量が増加していた。

図3に照射材(図中の●)と、室温引張材(図中の△)のKAMの結果を示す。なお室温引張材は対応する中性子照射量のdpa換算として、図中に示した。この図で室温引張を行った試料のKAMは耐力(変形量)に応じて直線的に増加していた。一方で照射材のKAMは0.5ではほぼ一定であり、照射量依存性は認められなかった。このことは照射材の歪は材料に等方的に導入され、転位のパイルアップ等に起因する結晶面の傾きが少ないことを示している可能性がある。今回0.06dpa以下のデータはないが、室温引張材の直線と交差する部分に0.06dpaのKAM値が存在することから、0.06dpa以下の照射材は室温引張材の直性に乗ることも考えられる。これについては今後の課題である。

著者らはこれまでに変形させた試料を用いて変形が必ずしも均一に起こらないこと、また変形に伴って粒内に変形に対するバリアが出現し、そのバリアの数は変形が進むにつれて増えていく可能性を指摘した。前報^[5]では結晶性の乱れがミスオリエンテーションに起因すると仮定し、それを「歪」と定義して、応力-歪の関係から「硬さ」と同等に取り扱ってきた。しかしながら今回の結果は、この仮定が必ずしも正しくない可能性を示唆する。応力腐食割れには最終的に変形が関与することから、照射材を変形させた場合の変形能についてあらためて試験を実施する必要がある。

4. まとめ

- 1) 重イオン照射材では照射量が増加しても結晶方位の乱れはほとんどみられなかった。またKAMの照射量依存性も認められなかった。この結果は前報と異なるため今後解明が必要である。
- 2) 室温引張変形材では粒界近傍と粒内の一部に大きな歪の領域が認められた。特に歪の大きな部分は粒界に集中していたが、粒内にも一部歪の大きな領域が観察された。
- 3) KAMの照射量依存性を見た結果、室温引張試料のKAMは耐力(変形量)に応じて直線的に増加する一方で、照射材のKAMは0.5ではほぼ一定であり、照射量依存性は認められなかった。

5. 参考文献

- [1] K. Hide, M. Mayuzumi, K. Tsuji, M. Narui, "Influence of deformation behavior on IASCC susceptibility for neutron irradiated type 304 stainless steels", Proc. of 13th APCCC, 16-21 Nov 2003, Osaka Univ.
- [2] K. Hide, T. Onchi, M. Mayuzumi, S. Dumble, "Correlation of Microchemistry and IGSCC Behavior for Irradiated Thermally-sensitized Type 304 Stainless Steels", Proc. 10th Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power System, Aug. 5-9, 2001, Lake Tahoe, Nevada, NACE (2001)
- [3] 秀耕一郎、渡辺英雄、「重照射を受けたステンレス鋼の照射誘起応力腐食割れ(IASCC)に及ぼす粒界特性に関する研究」、九州大学応用力学研究所 全国共同利用研究成果報告 第7号 (2003) p159
- [4] 秀耕一郎、太田丈児、渡辺英雄、「重照射を受けたステンレス鋼の照射誘起応力腐食割れ(IASCC)に及ぼす粒界特性に関する研究 その2」、九州大学応用力学研究所 全国共同利用研究成果報告 第8号 (2004) p159
- [5] 秀耕一郎、渡辺英雄、「重照射を受けたステンレス鋼の照射誘起応力腐食割れ(IASCC)に及ぼす粒界特性に関する研究 その3」、九州大学応用力学研究所 全国共同利用研究成果報告 第9号 (2005)

表1 化学組成と熱処理の条件

Element	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	N	Co	Fe
	0.063	0.5	0.98	0.026	0.045	9.99	18.65	0.036	<0.01	bal.

Thermally-sensitized treatment : SA(1100°C x 1hr) + sens.(650°C x 100 min + 750°C x 24 hr)

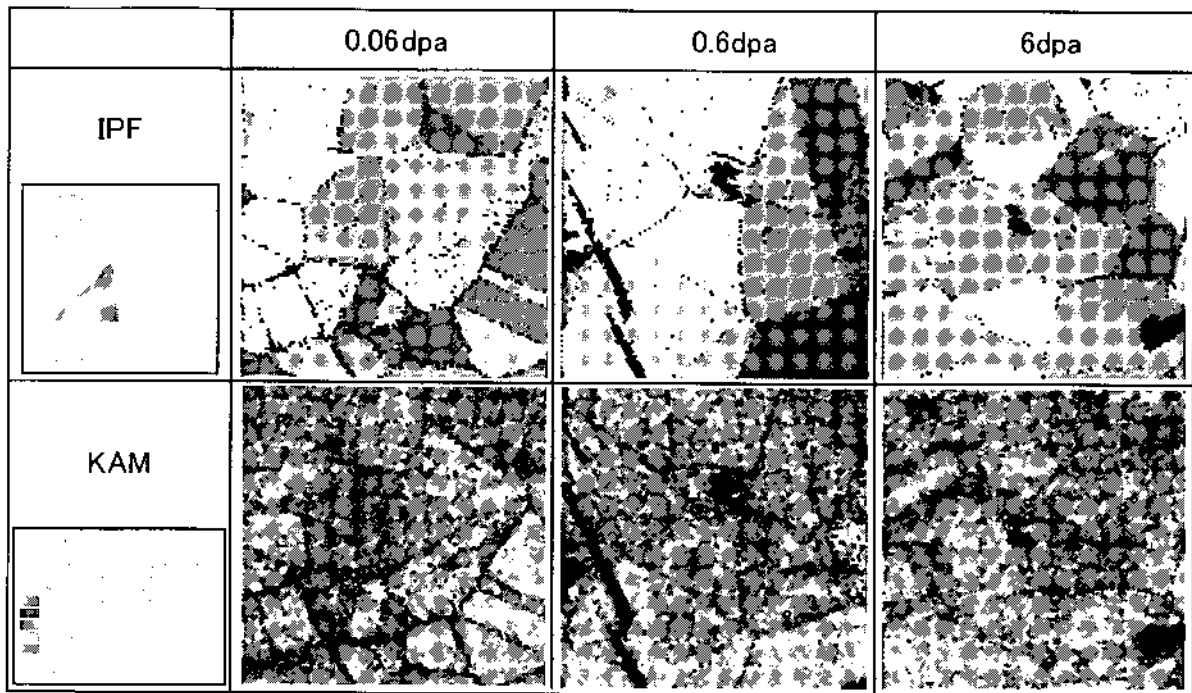


図1 重イオン照射材のKAM像 (Kernel Average Misorientation)

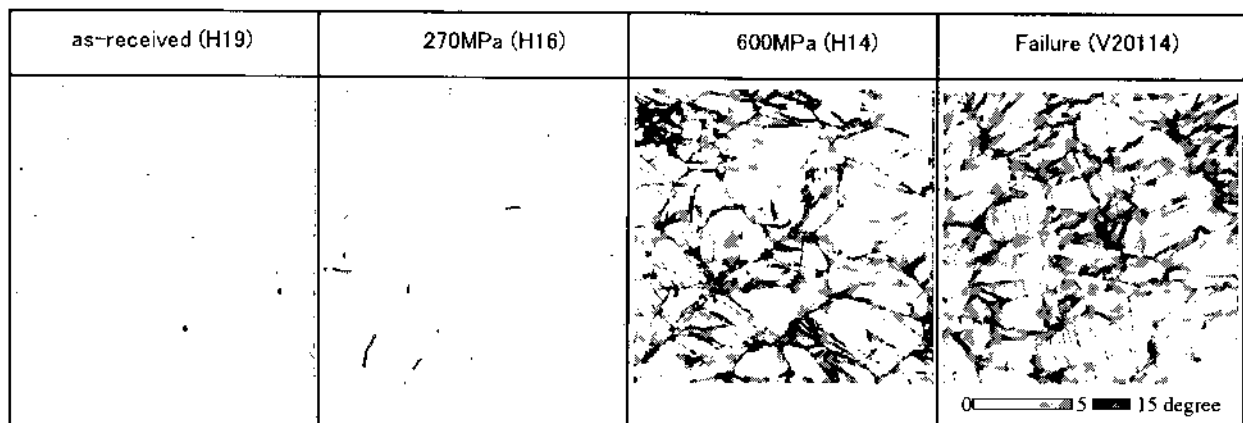


図2 室温引張変形させた試料のKAM像

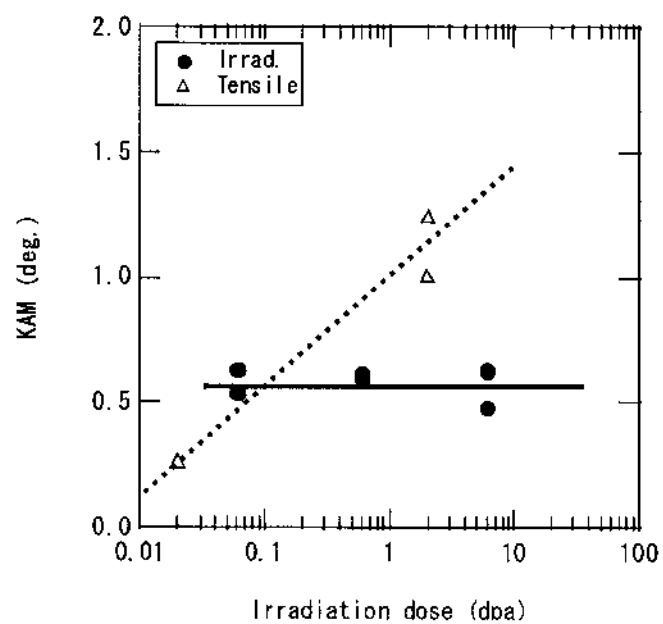


図3 重イオン照射材と室温引張材のKAMの照射量依存性

1. 目的

プラズマ中の粒子並びにエネルギー閉じ込め特性の評価やリサイクリング挙動を定量評価する為に、プラズマ内の中性粒子の密度・温度分布を知ることは、重要な研究課題となっている。特に長時間・定常状態における中性原子・分子の振る舞いは、プラズマ・壁相互作用の時定数が長い時間スケールを持っているため、非常に興味深い研究対象である。

本研究は、長時間プラズマにおける中性粒子の挙動を知ることが目的として、中性粒子輸送モンテカルロコードを、長時間プラズマを発生することのできるトカマク TRIAM-1M 装置に適用し、同時に TRIAM-1M プラズマからの H α 線や不純物発光等の測定結果を総合的に比較検討し、その結果から長時間プラズマに特徴的な中性粒子の挙動についての知見を得ることである。

2. 中性粒子輸送コード「DEGAS」

DEGAS コードとは、任意の 3 次元体系のプラズマをメッシュモデルで近似することにより、プラズマの中性粒子の密度・温度分布等をモンテカルロ法に基づいて求めるシミュレーションコードである。^[1] DEGAS コードでは、水素原子・分子に関わる種々の過程が考慮されているが、水素分子の解離過程に於て、解離反応の際に励起に関わる反応過程が考慮されていなかった。この過程は低密度の周辺プラズマ領域で特に影響が強いと考えられる為、後述するようにガンマ 10 タンデムミラープラズマや TRIAM-1M における長時間放電プラズマに適用する為には、上記反応を考慮するような改造が必要とされ、必要な改造を施した DEGAS コード (GDEGAS) を用いて計算を行ってきた。^[2]

GDEGAS を用いた中性粒子輸送シミュレーションは、これまでガンマ 10 のセントラル部のような軸対称な体系でメッシュを作成し、解析・研究が行われてきた。^[2-5] 近年、DEGAS において 3 次元体系での中性粒子輸送シミュレーション計算が可能なバージョン (ver.63) ^[6] の利用環境が整い、さらに現実のモデルに則した 3 次元シミュレーションが出来るようになった。

3. TRIAM-1M における中性粒子輸送シミュレーション

TRIAM-1M では、主半径方向及びトロイダル方向の計 14 箇所 H α 線検出器が設置されており、H α 線強度の空間分布測定結果、および上記シミュレーション解析に基づいて中性粒子の挙動研究が行われてきた。これまでの研究から、ポロイダル断面における H α 線強度分布は、モンテカルロシミュレーション結果とほぼ良い一致を見ていたが、トロイダル分布は、密度依存性が中性粒子の平均自由行程から説明出来ないことが明らかになっていた。このことを解明する為に、トロイダル方向の中性粒子の輸送解析を目的として、円筒軸対称メッシュモデルを用いてシミュレーションを行ったところ、実験結果と矛盾のない結果を得た。この結果から、トロイダル方向の H α 線強度プロファイルはスクレイブオフ層の厚みに強く依存していることが明らかになり、真空容器やプラズマの幾何学的形状が中性粒子の挙動に強く影響を与えていることを示唆した。以上の結果を踏まえて、完全 3 次元メッシュモデルを構築し、3 次元中性粒子輸送シミュレーションを行った。

図 1 は作成したメッシュモデルを示す。従来のジオメトリをそのままに完全 3 次元化を図っており、従来の粒子源が軸対称のリング状しか模擬できなかったものが、リミター上のホットスポットからの粒子源や、ガスパフによる局在化した粒子源に対応できるようになっている。直径は 39 cm、長さ 200 cm の材質 Fe の円筒壁を定義し、その中に径方向分割数 13、周方向分割数 24、軸方向分割数 21 のプラズマメッシュを構築している。ガス

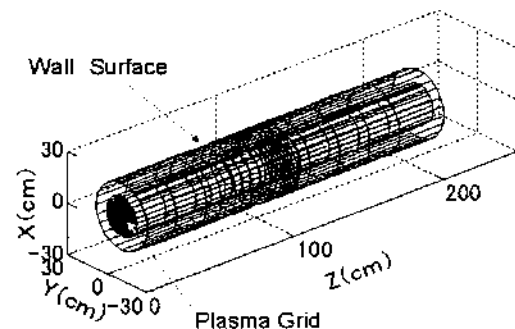


図 1 完全 3 次元化した円筒メッシュモデル

パフを模擬した粒子源は、 $z = 110$ cm の位置にある壁側面部に定義しており、水素ガス分子はコサイン分布で、メッシュ内に入射される。粒子源近傍の中性粒子密度を詳細に調べる為に、その周辺は 3 cm 間隔でメッシュを切っている。円筒の両端部は出口を定義しているが、ガスパフ位置から軸方向へ直径分以上離れているため、影響は無視できる。

図 2 は、上記メッシュモデルを用いて行った解析結果の一例を示す。これは円筒側面からのガスパフを模擬した際の中性水素分子および原子密度のシミュレーション結果である。下図に示す水素分子密度は、プラズマ半径方向に強く減衰し、軸方向及び周方向についてガスパフ位置直近に局在化しているのに対し、上図の原子密度は比較的、軸方向と周方向に拡散しており、径方向の減衰も小さいことが判る。以上のことから、幾何学的な形状(容器壁・粒子源の位置)やパラメータ分布(SOL 領域の密度・体積)に依存して、中性粒子は大きく影響を受けることが判った。

4. まとめと今後の展望

定常トカマク実験装置 TRIAM-1M のプラズマを想定した中性粒子輸送解析を、DEGAS 3 次元モンテカルロコードを用いて行った。これまでに得られた結果から、円筒モデルにおいても 3 次元化することにより、詳細な中性粒子輸送解析が出来ることが実証された。今後このような詳細な構造形成の機構について検討を進めてゆき、さらに現実に即した中性粒子輸送シミュレーションを遂行する予定である。

5. 参考文献

- [1] D. Heifetz, D. Post, M. Petravic *et al.*, J. Comput. Phys. **46** (1982) 309.
- [2] Y. Nakashima, K. Yatsu, K. Tsuchiya, *et al.*, J. Nucl. Mater. **196-198** (1992) 493.
- [3] Y. Nakashima, N. Yamaguchi, K. Yatsu, *et al.*, J. Nucl. Mater. **220-222** (1995) 580.
- [4] 中嶋, 庄司, 他 プラズマ・核融合学会 第 10 回年会予稿集 26aD8, p.146.
- [5] 中嶋, 庄司, 他 プラズマ・核融合学会 第 12 回年会予稿集 23aC1, p.261.
- [6] D. P. Stotler, *et al.*, Phys. Plasmas **3** (1996) 4084.

6. 研究成果

東園雄太, 第 21 回トライウム研究会, 2006 年 8 月, 九大応力研
 中嶋洋輔, 第 21 回トライウム研究会, 2006 年 8 月, 九大応力研
 M. Sakamoto, M. Ogawa *et al.*, Proc. of 21st Fusion Energy Conference (Chengdu) EX/P4-25.
 中嶋洋輔, 第 19 回トライウム研究会, 2005 年 4 月, 九州大学 FURKU, Report 05-01(82) p.82.
 中嶋洋輔, 第 22 回トライウム研究会, 2006 年 12 月, 九大応力研
 Y. Higashizono, Y. Nakashima, *et al.*, to be submitted to Jpn. J. Appl. Phys.

7. 研究組織

研究代表者	中嶋洋輔	筑波大学プラズマ研究センター	助教授
研究協力者	吉川正志	筑波大学大学院数理物質科学研究科	助教授
研究協力者	久保田雄介	筑波大学プラズマ研究センター	博士研究員
研究協力者	東園雄太	筑波大学大学院数理物質科学研究科	博士課程 4 年生
研究協力者	河野博一	筑波大学大学院数理物質科学研究科	博士課程 1 年生
研究協力者	坂本瑞樹	九州大学応用力学研究所	助教授

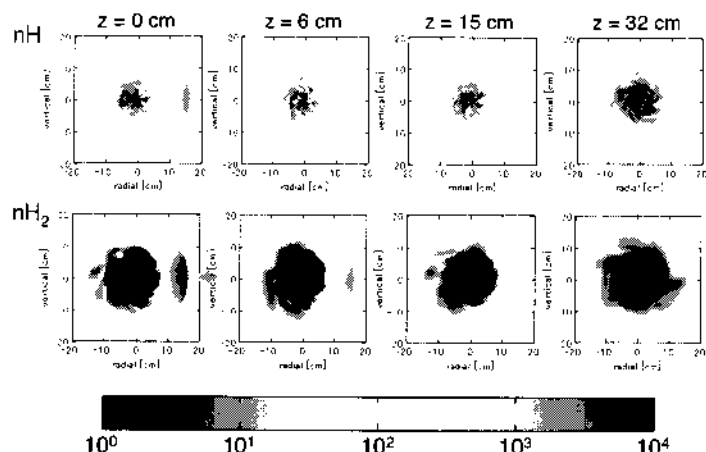


図 2 3 次元 DEGAS を用いて得られた中性水素原子分子密度のシミュレーション結果 ($z = 0$ cm 側面からのガスパフを模擬している。)

1. 序論

今日、磁気記録の高密度化のために記録単位を構成する磁性粒子の縮小化が進められている。そのため記録の熱安定性の観点から磁気異方性が高い $L1_0$ 規則構造を有する FePt 合金が新たな磁気記録媒体の候補材として注目されており、ナノスケールの FePt 粒子を非磁性母相に分散させた FePt ナノグラニューラー薄膜に期待が寄せられている。この材料に磁気記録として良好な物性を持たせるためには FePt 粒子のサイズ、形状および方位などを制御する必要がある。これらの制御方法を探るためにイオン照射の効果を明らかにすることを本研究の目的とした。実験ではイオン照射効果が FePt 粒子の 3 次元形状に及ぼす影響を調べるために透過型電子顕微鏡(TEM)による電子線トモグラフィーを用いて、FePt 粒子の形状、分散状態などの定量的な解析を行った。

2. 実験方法

実験に用いた試料は電気磁気材料研究所においてイオンスパッタ法によって作製された非晶質 Al_2O_3 に FePt ナノ粒子が分散した FePt ナノグラニューラー薄膜である。試料の組成は $(FePt)_{41}(Al_2O_3)_{59}$ 、 $(FePt)_{47}(Al_2O_3)_{53}$ の 2 種類で、薄膜の厚さは 20 nm である。これらの試料に対して真空中で 650°C 20 分間の熱処理を施した後、九州大学応用力学研究所タンデム加速器による 2.4 MeV Cu^{2+} イオン照射ならびに日本原子力研究開発機構のタンデム加速器による 210 MeV Xe^{14+} イオン照射を行い、イオン照射に伴う構造変化を TEM を用いて観察した。電子線トモグラフィーでは、九州大学超高压電子顕微鏡室の TECNAI-20(FEI 社製)および JEM-3200FSK(日本電子社製)を用いて、 $-60^\circ \sim 60^\circ$ の角度範囲で 2° ステップで明視野像を撮影した。そして、コンピュータ計算処理により 3 次元構築像を得た。構築した像から 3 次元座標を測定し、粒子サイズ、アスペクト比(長軸の長さ/短軸の長さ)および方位を定量的に評価した。

3. 結果および考察

図 1 にイオン照射前(650°C で 20 分間熱処理)の明視野像を示す。明視野像において黒いドット状に観察されるのが FePt 粒子であり、平均粒径は 6.4 nm であった。電子線トモグラフィーを用いて 3 次元像を構築し、アスペクト比を測定したところ、その平均値は 1.4 であった。膜面の法線方位から測定した粒子の長軸方向の角度を θ として、その分布を図 2 に示す。 θ は広く分布しており照射前の FePt 粒の方位はほぼランダムである。この

試料に対して 2.4 MeV Cu イオンを 5.0×10^{19} ions/ m^2 まで照射すると、明視野像では平均粒径が 5.6 nm に減少した他に特に顕著な変化は観察できなかった。しかし、図 3 に示す電子線トモグラフィーによる 3 次元構築像では、FePt 粒子が膜厚方向に伸びていることがわかる。この 3 次元構築像から粒子のアスペクト比を測定したところ平均値として 2.2 が得られ、定量的な解析からも粒子の伸びが確認できた。図 4 には θ 値のヒストグラムを示す。 0° 付近にピークがあり、強い方位性がある。このような Cu イオン照射による FePt 粒子の伸びがイオン照射方向に依存しているか、あるいは薄膜形状といった他の因子が影響しているかを調べるために Cu イオン照射を同じ照射量でイオン照射方向に対して試料を 46° および 60° 傾斜させて照射し、これらの試料に対してもトモグラフィー観察を行った。平均アスペクト比はどちらも 2.1 であり、傾斜して Cu イオン照射を行っても FePt 粒子は伸びることがわかった。それぞれの θ 値のヒストグラムを図 5 および図 6 に示す。 46° 傾斜試料では 46° 付近にピークがあるが、そのピークは低く、分布の幅は広い。一方、 60° 傾斜試料ではイオン照射方位付近にピークは見られず、 0° 付近にピークが現れた。このように、2.4 MeV Cu イオン照射によるナノ粒子の変形は、膜面に対するイオン照射方位に強く依存しており、照射イオンと粒子の直接的な相互作用とともに、膜面を介した影響が無視できないことが示唆される。

一方、2.4 MeV Cu イオンより強い電子励起を生ずる 210 MeV Xe イオン照射においては、照射量が 8.0×10^{17} ions/ m^2 までは FePt 粒子の粗大化が進むのみで粒子形状に顕著な変化は見られなかった。図 7 に Xe イオンを 5.0×10^{18} ions/ m^2 まで照射した試料の明視野像を示す。このとき、FePt 粒子に大きな変化が生じ、粒径の異なる 2 種類の粒子が観察された。この試料の電子線トモグラフィーによる 3 次元構築像を図 8 に示す。薄膜表面付近に大きく粗大化した球形の粒子と、膜の内部に著しく伸びたロッド状の粒子が形成されていることがわかる。210 MeV Xe イオンのような高速重イオンを照射した場合、高密度電子励起によりイオンの通過した領域が瞬間的に局所的な融解が生じ、イオンの軌跡に沿ってコラム状に構造が乱れたイオントラックと呼ばれる領域が形成することが知られている。FePt 粒子は融解し、凝固する際にイオントラックに沿った形状へと変化すると考えられる。しかし、照射量低い間は FePt 粒子の形状に顕著な変化が起こらず、照射量が増加するにつれて粒子形状の変化が観察されることから、粒子形状の変化

にはイオントラックの重畳効果が影響していると考えられる。

4. 結論

(1) FePt ナノグラニューラ薄膜に対して 2.4 MeV Cu イオンを照射すると FePt 粒子は長く伸びた形状へと変化する。

(2) 試料を傾斜させた状態で Cu イオン照射を行っても、粒子は伸びるが、その方向はイオン入射方向と一致しない。

(3) 210 MeV Xe イオンを 10^{18} ions/m² 以上照射すると

FePt 粒子は劇的に変化し、試料表面に球状に成長した粒子と膜厚方向に大きく伸びた粒子の 2 種類の粒子が現れる。

発表論文 : M. Shirai, T. Horiuchi, A. Horiguchi, S. Matsumura, K. Yasuda, M. Watanabe, and T. Masumoto, Mater. Trans. 47 (2006) 52-58.

55. M. Shirai, A. Horiguchi, K. Yasuda, S. Matsumura, M. Watanabe and T. Masumoto, Proc. of 16th Electron Microscopy Congress, (2006)704

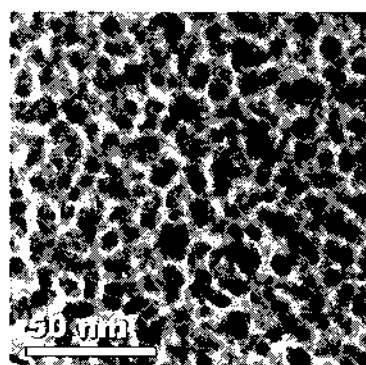


図 1 照射前試料(650°C20 分間熱処理)の明視野像

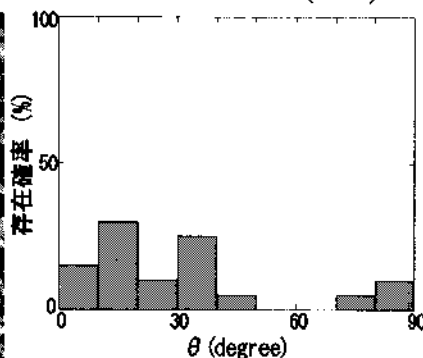


図 2 照射前試料(650°C20 分間熱処理)のθ値ヒストグラム

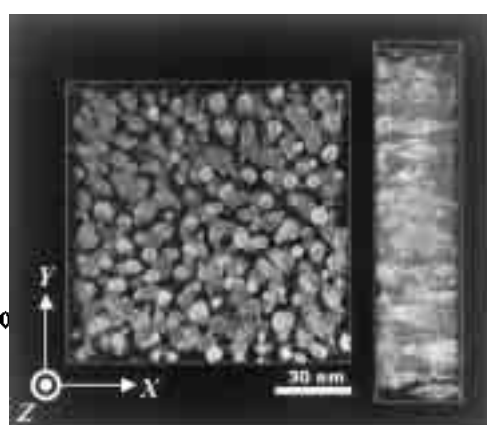


図 3 2.4 MeV Cu イオンを照射した試料の 3 次元構築像

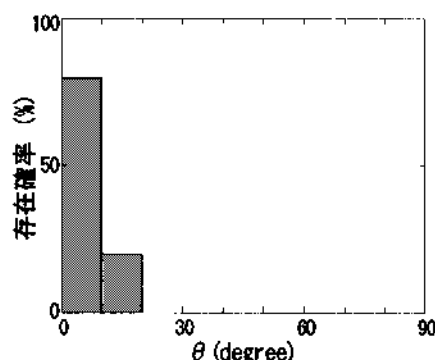


図 4 Cu イオン照射試料(傾斜なし)のθ値ヒストグラム

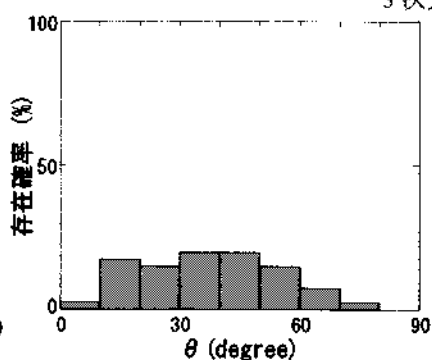


図 5 Cu イオン照射試料(46°傾斜)のθ値ヒストグラム

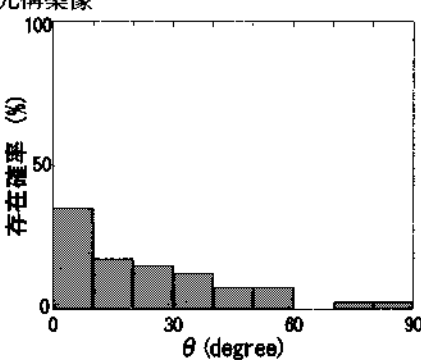


図 6 Cu イオン照射試料(60°傾斜)のθ値ヒストグラム

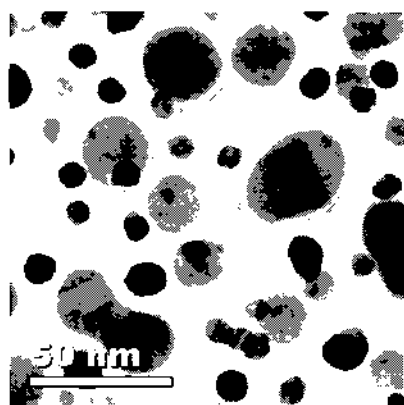


図 7 210 MeV Xe イオンを 5×10^{18} ions/m² まで照射した試料の明視野像

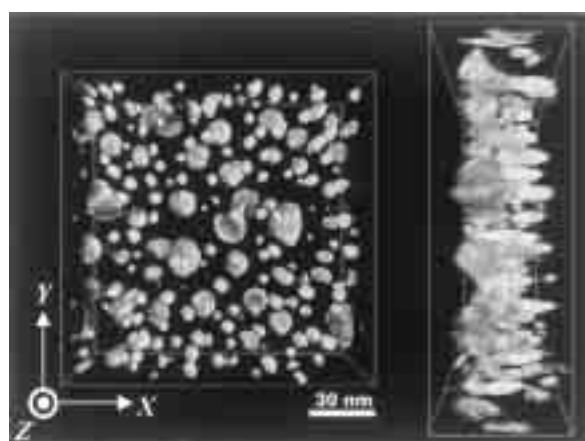


図 8 210 MeV Xe イオンを 5×10^{18} ions/m² まで照射した試料の 3 次元構築像

MgO・Al₂O₃ 中の転位ループ形成過程に及ぼす電場の効果

九大院・工 関 真一郎、山本 知一、安田 和弘、安永 和史、松村 晶

1. 緒言

MgO・Al₂O₃ は、これまでの研究から耐照射損傷性に優れることが報告されており、核分裂炉の次世代燃料や核変換処理用の不活性母材、および核融合炉の電気絶縁材として期待されている。このような放射線環境で使用される材料中には、弾性的なはじき出し損傷に起因する点欠陥が形成され、これらは離合集散過程を経て照射欠陥集合体を形成する。MgO・Al₂O₃ のようなイオン性結晶中に形成される点欠陥は電荷を付随するため、その離合集散過程は外部電場の影響を受けることが予想されるため、電気絶縁材としての使用を考慮した場合には、MgO・Al₂O₃ 中の照射欠陥形成に及ぼす外部電場の影響を明らかにすることは重要である。

本研究では、MgO・Al₂O₃ 中の照射欠陥の形成過程における電場の効果を明らかにすることを目的とし、電場中でイオン照射を受けた MgO・Al₂O₃ 中の転位ループ形成過程を透過電子顕微鏡(TEM)により調べた。

2. 実験方法

試料には、板面(100)の MgO・Al₂O₃ 単結晶(MTI 社製)を用いた。超音波カッターを用いて試料を直径 3 mmφに打ち抜き、回転研磨によって厚さ約 100 μmに加工後に、試料表面に電極としてTiを蒸着した。九州大学応用力学研究所のタンデム型イオン加速器で照射実験を行うために、図 1 に示すファラデーカップおよびフランジを製作した。図 2 に示す電場印加用加熱ホルダー（日本電子株式会社製）に試料を装着し、2.4 MeV Cu²⁺イオンを 300 kV/m の電場中もしくは非電場中で照射した。このときの照射温度は 873 K、照射線量は 4.4×10^{19} ions/m²とした。照射試料から TEM 観察用断面薄膜試料を作製し、TEM で観察を行った。

3. 結果および考察

図 3 に 300 kV/m の電場中、もしくは非電場中で 2.4 MeV Cu²⁺イオン照射した MgO・Al₂O₃ の断面試料の弱ビーム暗視野像を示す。いずれの試料においても、2.4 MeV Cu²⁺イオンの飛程近傍(1.5 μm)の領域に高密度の欠陥集合体が形成されている。0.5 μm 以下のイオン入射表面近傍の領域においては、電場中で照射した試料にのみ比較的大きな転位ループが低密度で観察される。この領域を拡大した明視野像を図 4 に示す。電場中で照射した試料では、深さ約 0.2 μm において直径約 8 nm の転位ループが形成されているが、非電場中で照射した試料では同程度の深さの領域にほとんど転位ループは形成されていない。以上の結果は、表面付近における欠陥集合体の形成過程は電場の影響を受けていることを示唆している。

4. 結論

- (1) 電場中でイオン照射が可能とするためのホルダー装着フランジおよびファラデーカップを製作した。
- (2) イオン照射した断面観察試料では、300kV/m の電場中で照射した試料にのみ、試料表面付近に大きな転位ループが確認され、格子間原子の離合集散過程に電場が影響していることを示唆する結果を得た。

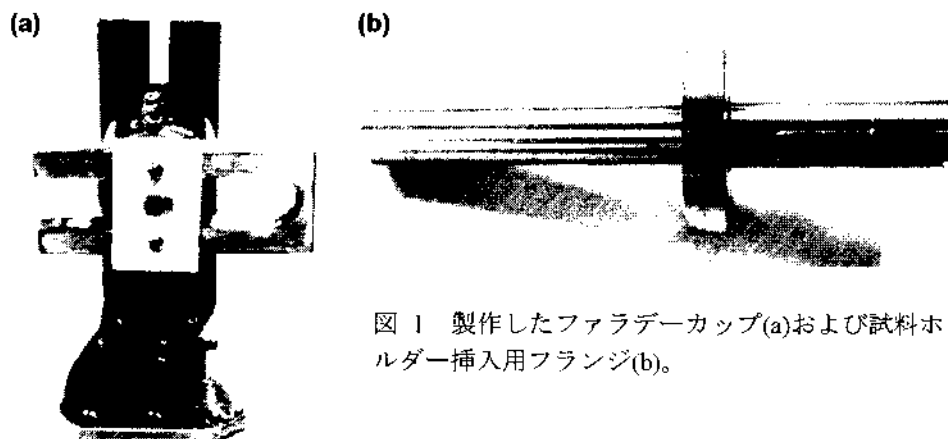


図 1 製作したファラデーカップ(a)および試料ホルダー挿入用フランジ(b)。

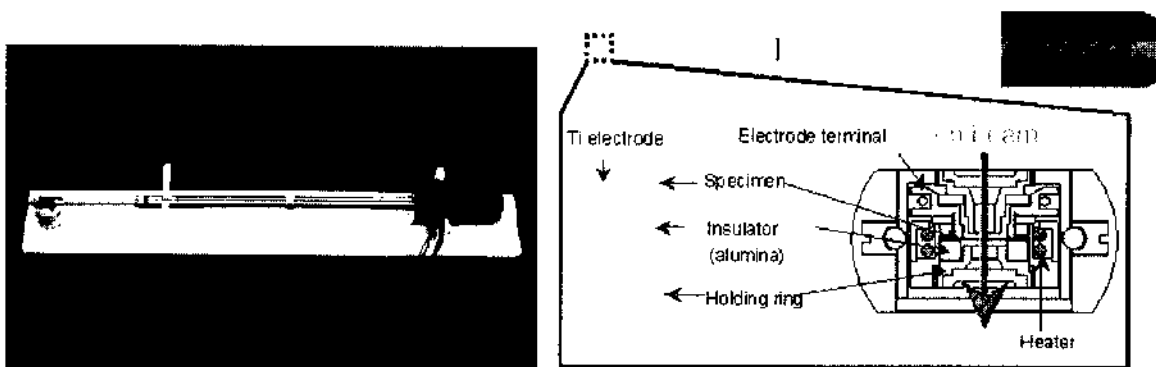


図 2 電場印加用加熱ホルダーの全体図 (左) および概略図 (右)。

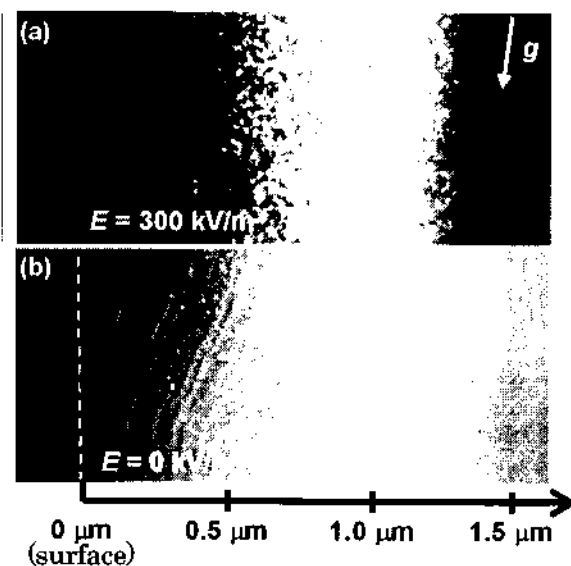


図 3 300 kV/m の電場中(a)および非電場中(b)で 2.4 MeV Cu^{2+} イオン照射した $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ の弱ビーム暗視野像。

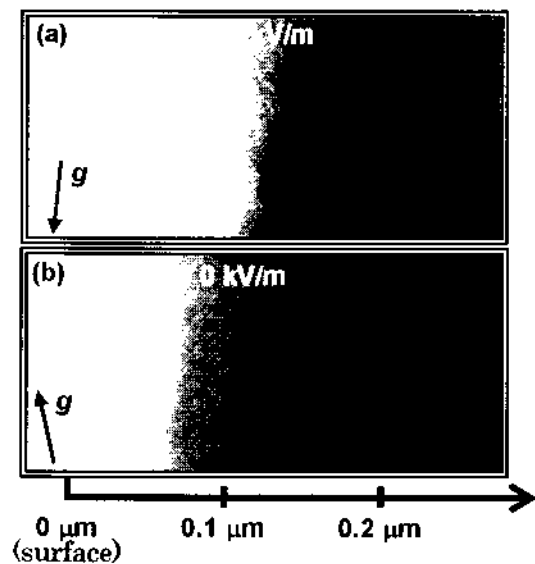


図 4 300 kV/m の電場中(a)および非電場中(b)で 2.4 MeV Cu^{2+} イオン照射した $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ の明視野像。

【目的】

核融合炉壁材料の照射損傷では核分裂炉に比較して一桁以上大きい核融合中性子エネルギー (1.4 MeV) によって 1) 高いPKAエネルギーに伴う原子多重衝突 (カスケード) の発生のほか 2) 原子核反応 (n, α) によるヘリウム原子の発生、および 3) 材料原子の核変換による合金効果などによって生じる材料の組織変化への影響が重要である。従来これらのうち部分的ないくつかの要素機構については多くの研究がなされているが、それらを総合して組織変化の定量的予測に結びつける試みについては、なお現象論的段階を多くは出していない。

以前に我々は1) のカスケードに伴う格子欠陥の発生と、それらの離合集散によって生じる欠陥クラスターの変動過程を、統計的に記述する一般的な方法を提案し、これら変動の効果は、とくに欠陥クラスターの核発生段階で大きく、それを通じて組織変化に及ぼす影響が大きいことを指摘した[1, 2]。しかしこの計算ではクラスター寸法を連続量により近似する方法が採られており、それはとくに微小クラスターに特徴的な整数的特性の取り扱いに問題を残していた。さらに2) のヘリウムの効果についてもこの段階で大きいことが知られている。従って本研究では微小クラスターの整数的特性とともに、これらに及ぼすヘリウム原子の効果をも考慮に入れる方法を発展させる。

【方法】

いま問題における現象の変化速度に着目して、これらをいくつかの段階に分け、各段階について統計的な考察を行う。1) カスケード発生の原子衝突過程。2) 移動速度の大きい点欠陥：格子間原子 (I) および格子間ヘリウム原子 (He)、の拡散過程。3) 移動速度のより小さい点欠陥：原子空孔 (V) および置換型ヘリウム原子 (VH)、の拡散過程。4) 不動クラスター：ポイド型 (V_n)、($V_n H_m$) およびループ型 (I_n)、(V_n)、ここに $n, m > 1$ はクラスターに含まれる点欠陥の数、への点欠陥吸収によるクラスターの成長過程の各段階である。

図1に一個の不動欠陥クラスター ($r=0$) の周りに発生するカスケードの時間空間的位置、位相空間 (r, τ)、を示す。ここで単純ポイド型クラスター V_n のV吸収による成長について方法を例示する。いま (r', τ') に発生したカスケードから点欠陥 (Vを仮定) が拡散しその先端が ($r=0, \tau=\tau_p$) に到達してクラスター (ポイド V_n を仮定) への吸収が開始される。

まずVの拡散については近似的に箱型分布 (球形内一様分布) を仮定。Vの吸収によって V_n が V_{n+i} に成長する確率 $F(n+i, t)$ の時間的変化は反応速度式により

$$(d/dt) F(n, t) = -K_n F(n, t),$$

$$(d/dt) F(n+i, t) = -K_{n+i} F(n+i, t) + K_{n+i-1} F(n+i-1, t)$$

ここに反応係数 K_n は拡散係数 D_v 、Vの分布密度 $C_v(t)$ および形状係数 k_n を用いて $K_n = k_n D_v C_v(t)$ と表される。 K_{n+i} が K_n に近い場合には $\int_0^\infty K_n d\tau = H_n = A$ として $F(n+i, \tau=0)$ はポアソン分布 $\exp(-A) A^i / i!$ により近似される。なお両者の差が大きいときには正確な積分値を用いて補正する。一般に照射組織は種々の型の欠陥クラスターの平均サイズ分布密度 $P(n, t)$ によって表されその確率過程的発展はChapman-Smoluchowskyの式

$$P(n, t) = \sum_m T(n, t; m, t - \Delta t) P(m, t - \Delta t) \quad (1)$$

によって記述される。ここに遷移確率 T は

$$T(n, t; m, t + \Delta t) = \iint (4\pi/3) p r^2 dr d\tau \sum_i F(m+i, \tau=0)$$

p はカスケードの位相空間 (r, τ) 内発生確率密度であり、 Δt は相関時間であり位相空間 (r, τ) 内の積分 $\iint p(4\pi/3) p r^2 dr d\tau = 1$ の条件より決められる。つぎに(1)式は相関時間 (Δt) のマルコフ過程としてFokker-Planckの式により近似される。その際輸送係数は際時間間隔 Δt 内のクラスターサイズの増分 $\Delta n = (n - m)$ の平均値および平均分散により表されるがそれらは遷移確率 T を用いて表される[1]。次にヘリウムを発生する照射場ではヘリウムを含む複合欠陥クラスター $V_n H_m$ の変化が問題になる。これには n, m の2変数を含む2次元の分布関数 $P(n, m, t)$ および確率密度 $F(n+i, m+j, t; n, m, t')$ が必要である。これらについてカスケードに伴う点欠陥 V, I の吸収過程については上述と同様にして取り扱うことができる。しかしカスケード特性に関係の少ない He および VHe の吸収については別の反応過程を考える必要がある。これらを分類してクラスターの成長を論じることができる。

格子間原子クラスターおよび転位網の形成 格子間原子クラスターの形成についてはカスケード形成初期の力学的過程において形成されると推定されている可動性クラスター(クラウドイオン型格子間原子と推定される)の役割が重要である。しかしこの型のクラスターは移動の初期段階で通常型の格子間原子クラスターに転化すると考えられる。したがってこれは残留クラスターの形成としてモデル化される必要がある。さらにこれらクラスターの成長による転位網への発展のモデルをも考慮する必要がある。

〔結果および結論〕

1) 高エネルギー中性子照射に特徴的なカスケードの発生、それに伴う多数の移動性点欠陥の発生と離合集散によって多種類の不動欠陥集合体が形成され変動的に成長してゆく過程に対し、これらを統計的に記述する理論を発展させ、特に微小クラスターの整数性を考慮に入れる方法を提案した。

2) さらにヘリウムの発生を伴う照射の場合については、ヘリウムを含む複合クラスターの発生成長に対する分析を行い同様の理論を発展させ、これらの過程に及ぼすヘリウムの著しい効果に説明を与えた。

3) 長期照射による組織変化に対する確率化定論的表式が得られ、各種クラスターの核発生および成長の長期的変化に説明を与えると共に、これらは現状では実験できない照射効果に対する定量的な予測手段を与えるものと考えられる。

研究協力者 九州大学応用力学研究所 吉田直亮 岩切宏友

文献

[1] K.Kitajima, J. Nucl. Mater. 133&134(1985) 64.

[2] K.Kitajima, J. Nucl. Mater. 191-194(1992) 1166.

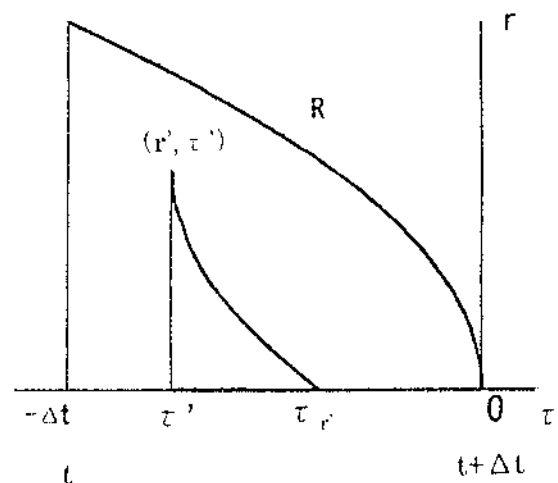


図1 一個の不動欠陥クラスター($r=0$)の周りに発生するカスケードの時間空間的位置の位相空間

タングステンと銅との接合材の組織と特性に及ぼすイオン照射効果

茨城大学工学部 車田 亮、今村好男

1. 目的

現在、耐熱性およびプラズマ粒子制御の観点から、核融合実験装置のプラズマ対向材料として、タングステン等の高Zプラズマ対向材料の使用が考えられている。今後、実用化を目指すために、それら材料のプラズマとの相互作用の究明や冷却構造材料との接合技術の確立が必要である。今までの応用力学研究所との共同研究において、C/C コンポジット、カーボンアロイ、炭素系接合材料、タングステンおよび SiC/SiC コンポジットについて、それらの微細組織と力学特性に及ぼすイオン照射の影響を究明し、耐照射損傷性を有するプラズマ対向材料の開発に役立つ知見を得てきた。本研究は、その対象材料を、プラズマ対向機器により近い状態のタングステンと銅との接合材に拡張し、接合材料の微細組織と力学的特性に及ぼすイオン照射の影響を究明するとともに、カーボンアロイと銅との接合材などとの比較検討も行い、高性能プラズマ対向機器の開発に役立つ知見を得ることを目的とする。

2. 実験方法

本研究に用いたタングstenは、アライドマテリアル(株)製の純タングsten応力除去材(純度 99.5%)であり、耐熱性や機械的性質に富み、化学的にも安定な高融点金属材料である。タングstenや無酸素銅の接合面を #2000 まで研摩及びアセトン洗浄した後、真空熱処理炉を用いて、接合温度 1273K、40 分間保持、小さな接合圧力 (0.014MPa) を加えた条件で、タングstenと銅との接合材を製作した。その接合において、接合時の残留熱応力を緩和するために、中間材としてニッケル板 (1.0mm) またはモリブデン板 (1.0mm) を挿入し、インサート材としてチタン箔 (0.05mm) と銅箔 (0.05mm) を挟んで、チタンと銅との共晶反応を利用して拡散接合した。その後、この接合材の機械的特性に及ぼすイオン照射の影響を究明するために、接合界面を含んだ試験片(縦 10mm、横 5mm、厚さ 1mm) を切り出した。

イオン照射試験は、九州大学応用力学研究所の高エネルギーイオン発生装置を用いて、接合界面を含んだ試験片中央の約 $\phi 3\text{mm}$ の範囲に、5.5nA のイオンビーム電流で、銅イオン (Cu^{2+}) を、タングstenの場合 1.0dpa および 10dpa になるまで、接合界面近傍の表面に照射試験を実施した。その飛程は 350nm である。

機械的特性の変化は、超微小押し込み硬さ試験機 (DUH-201) により、対稜角 115 度の Berkovich ダイヤモンド圧子を用いて、ダイナミック硬さを測定した。ダイナミック硬さ D_h は、ビッカース硬さに対応しており、次式で定義される。

$$D_h \equiv \alpha L/h^2 \quad (1)$$

ここで、 L は試験荷重 (mN)、 h は圧子の試料への押し込み深さ (μm)、 α は圧子形状による定数で、対稜角 115 度の Berkovich 圧子の場合 $\alpha=3.8584$ である。このダイナミック硬さは、圧子を押し込んで行く過程の荷重と押し込み深さから得られる硬さで、試料の塑性変形だけでなく、弾性変形をも含んだ状態での材料強度特性である。その試験条件は、銅イオンの飛程と圧子の押し込み深さがほぼ等しくなるように、負荷荷重を 19.6mN、荷重負荷速度を約 8%full scale/sec、荷重保持時間を 1.0sec とした。また、データ数は、5 から 10 点である。

また、SEM および TEM を用いて、試験片の表面損傷および微細組織の変化を観察し、機械的性質の変化と微細組織との関係を考察した。

3. 実験結果及び考察

Fig.1 は、一例として、タングstenと銅との接合材に対する押し込み硬さ試験の結果(照射温度 573K、Cu イオン照射)を示す。接合界面から離れたタングsten部分(0mm~2.0mm)では、ダイナミック硬さが未照射から 1.0dpa、10dpa と照射量の増加に伴って、硬さの値がほとんど変化していない。しかし、照射材においては、その硬さのばらつきが大きい。この理由としては、高温において、照射欠陥が結晶粒界に拡散し、欠陥集合体の形成や消滅などが起こり、硬さの測定位置に

より、欠陥集合体や回復部分であったためと考えられる。同様に、接合界面から離れた銅部分(3.0mm～5.0mm)でも、573K の高温照射においては、ダイナミック硬さが照射量の増大に伴って、ほとんど変化しなかった。

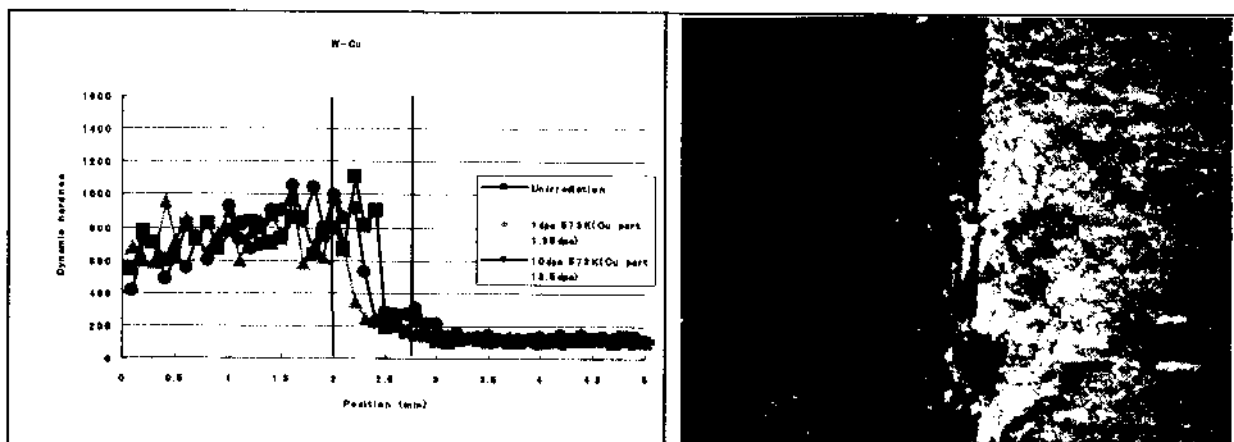


Fig.1 Dynamic hardness after irradiation at 573K. Fig.2 SEM image after 10 dpa irradiation at 573K. $\overline{1\mu m}$

一方、接合界面(2.0mm～3.0mm)は、未照射材においては、接合領域のタングステン側の接合界面で最大の硬さを示した。硬さの最大値を示した理由は、接合時の残留熱応力のためと考えられる。また、接合層内のダイナミック硬さは、未照射材と比較して 1dpa 照射材では硬さは増加しているが、10dpa 照射材ではダイナミック硬さが未照射材と 1dpa 照射材の中間の値となった。10dpa 照射材では、硬さが増加する最大の照射量を超え、ボイドのような硬さを減少させる欠陥の密度が高くなり、かつそのボイドが接合時の残留応力も緩和するため、硬さが最大値から減少傾向に転じたと考えられる。

Fig.2 は、一例として、タングステンとニッケル中間板との接合界面(照射温度 573K、10dpa の Cu イオン照射)の SEM 観察写真を示す。まず、接合界面には、亀裂などがなく、良好な接合が確認できる。本研究における接合方法によれば、タングステンドライバ機器などの製作が可能になる。また、接合界面およびタングステン部分の表面には $1\mu m$ 以下の凸凹があり、表面スパッタリング損傷が確認できる。この表面損傷量は、室温照射の場合より明らかに少なく、高温照射では、表面損傷が抑制されることが分かった。

4. 研究成果報告

- 1) 車田 亮、今村好男、全国共同利用研究成果報告 No.9, 九州大学応用力学研究所, (2006), 156-157.
- 2) 車田 亮、今村好男、東北大学金属材料研究所附属量子エネルギー材料科学国際研究センター共同利用研究経過報告書, (2006.7), CD-II-3, 20.
- 3) A.Kurumada, Y.Imamura, T.Oku, K.Sawa, T.Shibara, S.Baba, J.Aihara and S.Hanawa, JAEA-Review 2006-029, JAEA-Tokai TANDEM Annual Report 2005, JAEA, (2006.9), 107-108.
- 4) T.Oku, A.Kurumada, Y.Imamura and M.Ishihara, Effects of Ion Irradiations on the Hardness Properties of Graphites and C/C Composites by Indentation Tests, 7th International Nuclear Graphite Specialists Meeting, Oak Ridge, USA, (2006.9.10-13).
- 5) 外川賢、車田亮、渡辺英雄、吉田直亮、他、日本機械学会関東支部茨城講演会, (2006.9.15), 11-12.
- 6) 車田、今村、渡辺、吉田、他、タンデム領域の重イオン科学研究会、東海, (2006.12.14-15).

5. 研究組織

茨城大学工学部： 車田 亮(助教授)、今村好男(講師)

九州大学応用力学研究所： 渡辺英雄(助教授)、徳永和俊(助教授)、吉田直亮(教授)

茨城大学大学院： 外川 賢(M2)

金属- Al_2O_3 界面および酸化物- Al_2O_3 界面におけるイオンビームミキシング

大阪府立大学大学院工学研究科 岩瀬彰宏

1. はじめに： 高エネルギー重イオン照射下においては、材料中の原子系や電子系が高密度励起状態になる。それらの急激な緩和過程に伴い、異なった物質同士の界面では、双方からの原子の拡散によりミキシングが生ずることがある。この現象をイオンビームミキシングと呼んでいる。この現象は、通常の熱平衡下では起こり得ない照射に伴う特徴的なプロセスである。したがって新しい物質相形成への応用が考えられる。しかし、この現象を支配するパラメータは多く、その機構についての十分な理解は未だ得られていない。そこで、金属-酸化物、及び、酸化物-酸化物界面におけるイオンビームミキシングの差を議論して、その基礎過程の理解を得ると共に、物質創製へ向けての基本データを構築することを、本研究の目的とする。
2. 実験：本実験では、サファイア基板上にビスマス(Bi)を蒸着した系、および同じくサファイア基板上にセリア(CeO_2)をコーティングした系を用いた。サファイアとビスマスの融点は大きく異なること、そして、サファイアとセリアの融点はいずれも高温であるため、双方とも通常の温度での熱処理で両者をミキシングさせるのは非常に困難であると考えられる。2種類の試料は、九州大学応用力学研究所タンデトロン加速器においてエネルギー2.4 MeVの銅イオンを照射した。照射温度は室温、ビーム電流は15 nA、ビーム径は約4 mmであった。照射した試料は大阪府立大へ持ち帰り、IBA9900加速器を用いてラザフォード後方散乱分光法(RBS法)による測定を行った、用いたヘリウムビームのエネルギーは2.4 MeVである。
3. 実験結果と考察：図1に、ビスマスをコーティングした試料を銅イオンで照射した後RBSピークを測定した結果を、銅イオン照射しない試料のRBSスペクトルと比較したものである。照射によるRBSピークの変化はほとんど見られない。これは、本実験で用いた程度の照射量では、アルミナとビスマスの界面での原子のミキシングは起こらないことを意味するものである。一方、100 MeV領域のイオンを照射した酸化物-酸化物界面の場合、照射イオンの高密度電子励起によってターゲット原子にエネルギーが与えられ、その結果、イオンビームミキシングが起こることが見出されている[1]。低エネルギーイオンの場合の酸化物-酸化物海面でのミキシングはどうなるかを見るために2.4 MeVの銅イオン照射した $\text{CeO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 界面でのRBS測定を行うことは大変興味深い。照射実験はすでに終わっており、RBS測定に関して現在準備中である。

参考文献

- [1] W. Bolse, B. Schattat, A. Feyh, T. Renz, Nucl. Instr. Meth. B218(2004) 80-88.

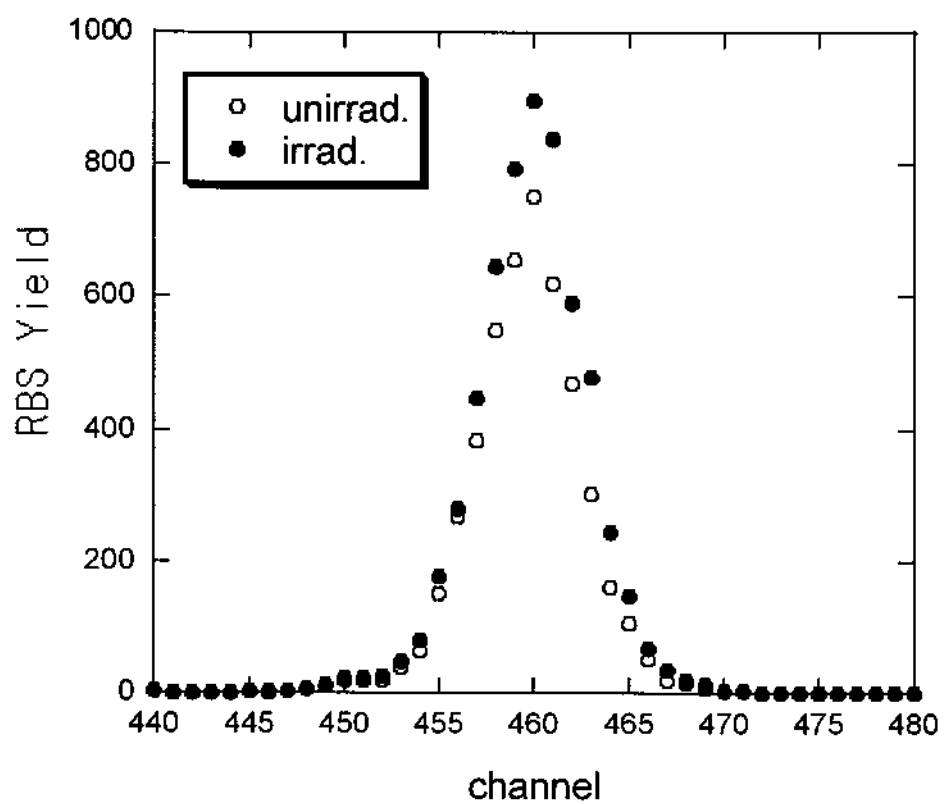


図 1

2.4MeV銅イオンを照射した試料と未照射試料に対するRBSスペクトルの比較。ビスマスに対するピークのみを示す。

TRIAM-1M および小型 PWI 実験装置における高周波波動伝搬および電流駆動の検討

有明工業高等専門学校・一般教育科 竹内伯夫

【研究目的】

核融合プラズマ研究において、定常プラズマを維持するために非誘導電流駆動の開発・研究が必要不可欠である。現在、高周波電磁波動を用いた電流駆動法や中性粒子入射を用いた電流駆動法などが提案され、実験が行われている。TRIAM-1M においても低域混成波、電子サイクロトロン波を用いた電流駆動が行われ、実績を上げてきた。一方、理論計算において九州大学の小型 PWI 実験装置において電子サイクロトロン／パーシュタイン加熱・電流駆動の研究が盛んに行われているが、3次元波動伝搬解析コード「TASK」は核燃焼プラズマ統合コードとして進展しており、各大学・研究機関において統合コード構想への活動が活発に行われている。電流駆動の実験と波動伝搬解析による理論との両面から考察することにより、非誘導電流駆動の研究のさらなる発展が期待できる。そのために、波動伝搬解析モジュール「TASK/WR および WM」を用いて、既存の核融合実験装置や小型 PWI 装置における高周波波動伝搬解析、電流駆動の検討を進めてゆく。

まずは光線追跡のためのコード「TASK/WR」を用いてイオンサイクロトロン周波数帯 (ICRF) の速波を用いた波動伝搬に関して検討する。速波による電流駆動は伝搬特性がプラズマ密度に依存しない特長があり、各大型装置で実験が行われている。平成 18 年度は簡単なトカマクモデルを用いて ICRF 速波に関して光線追跡の解析を進め、TASK/WR の改善点を明らかにした。

【計算方法・原理】

光線の位置ベクトル $\vec{r}$ と波数ベクトル $\vec{k}$ は

$$\frac{d\vec{r}}{dt} = -\frac{\partial G}{\partial \vec{k}} \bigg/ \frac{\partial G}{\partial \omega}, \quad \frac{d\vec{k}}{dt} = \frac{\partial G}{\partial \vec{r}} \bigg/ \frac{\partial G}{\partial \omega} \quad (1)$$

で表される 2 つの方程式 (ω は波の振動数) の時間発展を解くことによって求めることができる。ここで $G=0$ は波の分散式を示す。磁場方向に z 軸、 z 軸から x 軸の方向に θ ずれた方向に波数ベクトルをとると、熱いプラズマの分散式は

$$G = \begin{vmatrix} K_{xx} - N_z^2 & K_{xy} & K_{xz} + N_x N_z \\ K_{yx} & K_{yy} - N_x^2 - N_z^2 & K_{yz} \\ K_{zx} + N_x N_z & K_{zy} & K_{zz} - N_x^2 \end{vmatrix} = 0 \quad (2)$$

と表すことができる。ICRF 速波においては冷たいプラズマの分散式

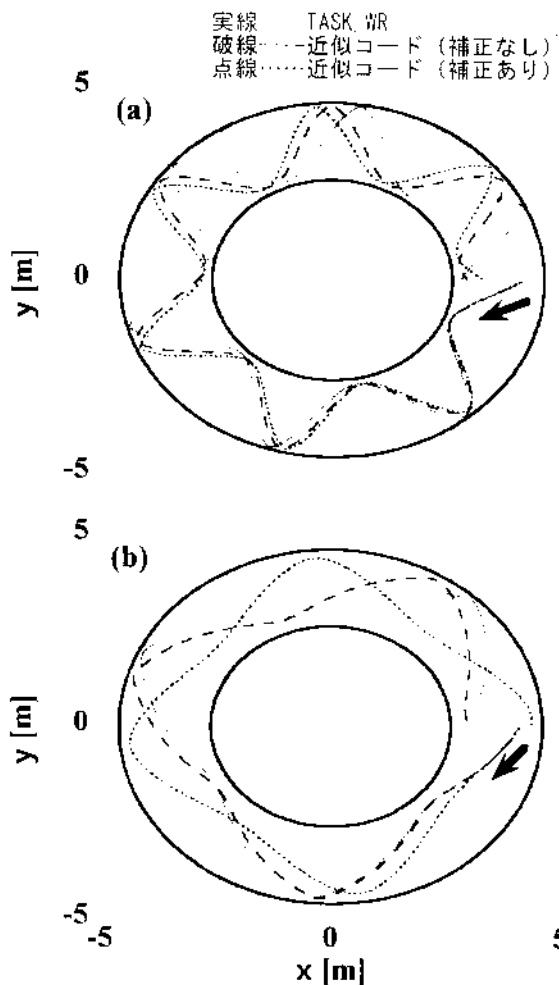
$$G = \text{Re}[(K_{xx} - N_z^2)(K_{xx} - N^2) + K_{xy}^2] = (S - N_{||}^2)(S - N^2) - D^2 = 0 \quad (3)$$

と近似することが慣用的に行われている^[1-2]。TASK/WR コードでは (2) 式を用いて光線を追跡しているが、(3) 式を用いた計算コードによる計算結果と比較することで、分散式の近似による光線追跡の影響が確認できる。また、光線追跡法では (1) 式を数値的に解く際に $G=0$ が満たされるように光線を追跡してゆくが、実際の計算では G の値が変動し、0 から大きく外れていることがある。ICRF のように、波長が実験装置に比べて長い周波数帯では WKB 近似が成り立たない可能性があり、理論計算には注意が必要である。

【計算結果】

計算条件として、プラズマ大半径 3.6m、プラズマ小半径 1.0m、ポロイダル磁場が存在しないトカマク

モデルとし、 $x=4.1\text{m}$ 、 $y=0\text{m}$ の地点から水平方向に波を入射させた。ステップの刻み幅は 1.0mm とした（波長に比べて十分に小さい）。2つの場合、すなわち (a) 周波数 38.47MHz 、磁場 1.5T 、磁場に平行方向の屈折率 $N_{\parallel}=6.2$ （大型実験装置 LHD において電子加熱とイオン加熱が競合する条件：実際に行われた ICRF 実験と計算の比較ができるようにこの変数を採用した）と、(b) 周波数 75.0MHz 、磁場 1.5T 、 $N_{\parallel}=8.8$ （LHD において電子加熱および電流駆動が期待できる条件）を適用し、比較した。



2つの異なる $N_{\parallel}$ を計算条件の例としたのは、波がカットオフ層で反射される回数や分散式 G の値の 0 からずれ易さに対する光線軌道の影響を調べるためである。

図は装置の赤道断面に対して計算から得られた光

線軌道を示したものである。実線が TASK/WR による光線の軌道、破線が近似コード（補正なし）による軌道、点線が $G=0$ を満たすように分散式に補正を加えながら追跡した近似コード（補正あり）による軌道である。波はいずれも図の時計回りの方向に伝搬し、一周分のみ示している。

【考察】

2つのそれぞれの図において TASK/WR コードによる軌道と近似コード（補正なし）による軌道とを比較した場合、全体的に見るといずれの条件の場合も2つの軌道が良い一致を示していると解釈できる。軌道の差が見られるのは TASK/WR と近似コードにおいて、適用している分散式が異なるためであると考えられる。次に、近似コード（補正なし）による軌道と近似コード（補正あり）による軌道を比べた場合、同じ分散式を適用しているのに対し、軌道がずれていることが確認できる。近似コード（補正あり）の方が TASK/WR コードによる軌道とのずれが大きくなっており、特に $N_{\parallel}$ の大きい条件 (b) の方では近似コード（補正なし）と比べても大きく軌道が変わっていることが分かる。このことは、分散式の値が 0 からずれてくると、その光線の軌道は $G=0$ を満たす軌道から大きくずれることを示しており、光線追跡長が長くなると TASK/WR コードにも分散式の補正が必要になることを意味している。

今後は、 G の補正を TASK コードに組み込み、本研究の大きな目的である TASK/WM を用いて波動伝搬および電流駆動の検討を進めてゆく。

【参考文献】

- [1] T. H. Stix, "WAVES IN PLASMA", AIP (1992).
- [2] N. Takeuchi, et al., J. Plasma Fusion Res. SERIES 6 (2004).

昇温時におけるタングステン表面プリスタの爆裂のSEM観察

独立行政法人 日本原子力研究開発機構 核融合研究開発部門
トリチウム工学研究グループ 洲 亘

1. 目的

九州大学応用力学研究所の昇温機構付き走査型電子顕微鏡を用い、低エネルギー高フラックスの重水素プラズマ照射によるタングステンでのプリスタについて、昇温に伴う爆裂を直接観察し、ITER ダイバータのプラズマ対向材料であるタングステンにおけるプリスタの爆裂挙動を解明する。

2. 実験方法

(1) 再結晶タングステン試料の作製：九州大学応用力学研究所においてタングステンの試料片(10 mm×3 mm×0.1 mm)を電解研磨した後、2273 Kで2分間再結晶の熱処理を行った。

(2) プラズマ照射実験：原子力機構において、図1のような低エネルギー高フラックスの重水素プラズマ照射装置を用いタングステンでのプリスタ試料を作製した。照射条件はエネルギー38 eV;フラックス 10^{22} D/m²s;フルエンス 10^{27} D/m²;温度 410 Kである。

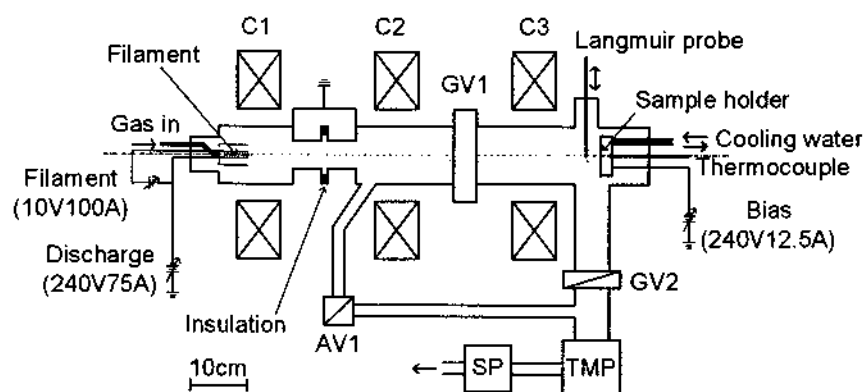


図1 プラズマ照射装置の模式図

(3) SEM観察：原子力機構において、重水素プラズマ照射前後のタングステン表面を観察し、重水素プラズマ照射によるプリスタリングを確認した。また、九州大学応用力学研究所において、昇温に伴うプリスタ爆裂を昇温機構付き走査型電子顕微鏡(SEM)による直接観察を試みた。

3. 実験結果

重水素プラズマ照射前のタングステン表面 SEM 像を図2に示す。再結晶組

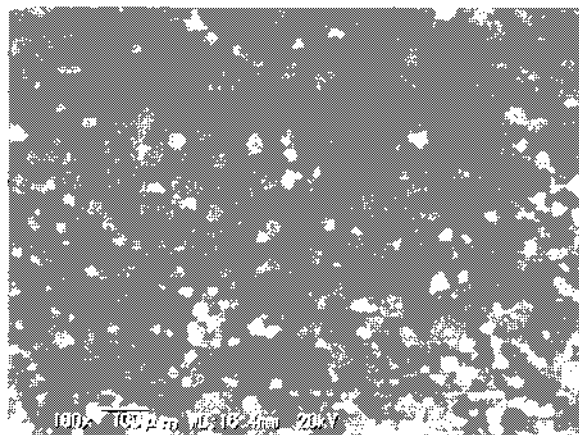


図2 重水素照射前の再結晶組織タングステン

織であることを確認した。

重水素プラズマ照射後のタングステン表面 SEM 像を図 3、図 4 に示す。ブリストの形成が確認された。しかし、昇温に伴うブリスト爆裂を昇温機構付き SEM による直接観察がまだ成功しなかった。

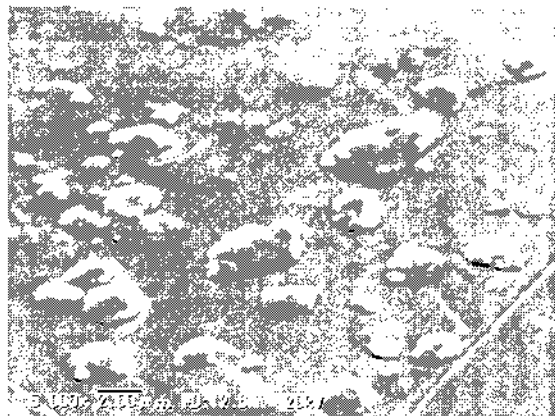


図3 ブリストの SEM 像 (5000 倍)



図4 ブリストの SEM 像 (2500 倍)

4. 考察

形成されたブリストの特徴は以下のとおりである。

- ① 結晶粒内に多数のブリスト現れた；
- ② ブリストが多層構造を有している；
- ③ 一部のブリストに爆裂の跡が見られた。

これらの特徴は、2073 K で再結晶の熱処理を行ったタングステンの重水素照射によるブリストリング挙動[1-3]とよく一致している。また、ブリストの爆裂に伴い、重水素の爆発的な放出も観測された[1, 3]。ブリストの爆裂と重水素の爆発的な放出は、炉心プラズマへの不純物混入や突発的な水素リサイクリングを引き起こすため、その原因の究明と抑制・制御手法の開発が重要な課題となっている。その研究の一環として、昇温に伴うブリスト爆裂を昇温機構付き SEM による直接観察が期待される。

5. 研究組織

原子力機構側： 洲 亘、核融合研究開発部門 核融合エネルギー工学研究開発ユニット
トリチウム工学研究グループ、研究主幹

九州大学側： 徳永和俊、九州大学 応用力学研究所、プラズマ・材料力学部門
プラズマ表面相互作用分野、助教授

6. 参考文献

1. *W.M. Shu, E. Wakai and Y. Yamanishi*, “Blister bursting and deuterium bursting release from tungsten exposed to high fluences of high flux and low energy deuterium plasma,” **Nucl. Fusion** **47** (2007) 201-209.
2. *W.M. Shu, G.-N. Luo and T. Yamanishi*, “Mechanisms of Retention and Blistering in Near-Surface Region of Tungsten Exposed to High Flux Deuterium Plasmas of Tens of eV,” **J. Nucl. Mater.**, (2007) in press.
3. *W.M. Shu, A. Kawasuso, Y. Miwa, E. Wakai, G.-N. Luo and Y. Yamanishi*, “Microstructure dependence of deuterium retention and blistering in the near-surface region of tungsten exposed to high flux deuterium plasmas of 38 eV at 315 K,” **Physica Scripta**, (2007) in press.

NBI 用負イオン源プラズマの生成と制御

山口大学大学院理工学研究科 福政 修

1. 研究の目的

中性粒子ビーム入射装置 (Neutral Beam Injector : NBI) 用の水素/重水素負イオン源の開発を進めている。今後のNBI用負イオン源では、イオン源の長寿命化と高負イオン比 (負イオン/正イオン密度 ~ 1) のプラズマ生成が必要である。本研究では、従来法と異なる「フィラメント不要」、「セシウム不要」、「磁気フィルター不要」の理想的な負イオン源の開発を目指す。具体的には、RF放電プラズマを対象にその生成と制御により負イオン源プラズマへの応用可能性を検討する¹⁾。

DC放電プラズマ中のプラズマパラメータ制御には磁気フィルター法が用いられているが²⁾、RF放電プラズマのパラメータ制御にはそれほどうまく適用できない³⁾。本研究ではグリッド負バイアス法^{4,5)}によるRFプラズマパラメータ制御を試み、磁気フィルター法との比較も含めて負イオン生成の高効率化を検討した。

2. RF 負イオン源の概要

図1にRF放電プラズマ実験装置の概略図を示す。放電容器は直径21cmのステンレス製の円筒容器で、プラズマ生成領域 (上流)、メッシュグリッド、拡散プラズマ領域 (下流) から構成されている。メッシュグリッドを軸方向の原点として、メッシュグリッドから上流側 13.5cm の位置に円盤アンテナを設置して、13.56MHz の高周波電圧を印加してプラズマ生成を行う。容器外周に永久磁石 (ネオジウム) を配置して構成した 12 極のラインカスプ磁場によって、生成されたプラズマは閉じ込められている。

メッシュグリッドとして 50、30 および 7 mesh/inch の 3 種類を用い、負バイアス印加によるプラズマの空間分布制御について検討した。また、ロッド型磁気フィルターをメッシュと交換して磁気フィルター制御による負イオン生成の比較実験を行った。

エンドプレート後方より軸方向に可動なプローブを挿入して拡散プラズマ領域を、また $z = 4, 11\text{cm}$ の位置に径方向より挿入したプローブによりプラズマ生成領域のプラズマパラメータ (電子密度 n_e 、電子温度 T_e 、空間電位 V_s 、浮遊電位 V_f) を測定した。プラズマグリッド中央に設けた 10 ϕ 単孔より負電流を引出し、磁場偏向型イオン分析器により負イオン電流を測定した。

3. 実験結果および考察

図2にプラズマパラメータの軸方向分布を示す。実験条件は、RF放電電力 $P_{\text{RF}} = 200\text{W}$ 、水素ガス圧 $p(\text{H}_2) = 3\text{ mTorr}$ 、アンテナ直径 $D_a = 12\text{cm}$ 、グリッドバイアス電圧 $V_g = -50\text{V}$ である。グリッドバイアス法の場合には、いずれのメッシュでも T_e は下流側で 1 eV 程度まで低下し、また n_e は下流側で増加している。特に 50 メッシュの場合のプラズマ特性は負イオン生成に好都合な空間分布となっている。静電的制御法なのでメッシュ線間隔とデバイ長の関係を無視できないが、幾何学的透過率の高い 50 メッシュが下流側の高密度プラズマ生成には適している。プラズマ制御に関して、磁気フィルター法の結果を同様に示すが、 T_e はフィルターの前後でほとんど変化せず、下流側でも 4 $\sim$ 5 eV と高い値を維持している。一方、 n_e は下流側で低下する傾向にあり、負イオン生成を低下させるプラズマ状態となっている。

図3に引出し負イオン電流の放電電力依存性を示す。実験条件は、 $p(\text{H}_2) = 2\sim 3\text{ mTorr}$ 、 $D_a = 15\text{cm}$ 、 $V_g = -50\text{V}$ 、引出し電圧 $V_{\text{EX}} = 1\text{ kV}$ である。エンドプレートの位置 Z_{end} はそれぞれの条件下で最適位置をとっている。負イオン電流は P_{RF} の増加に比例して増加していることが分かる。これは P_{RF} が増加することによる拡散プラズマ領域での (T_e は 1 eV 程度にとどまったままで) n_e の増加が主な原因である。メッシュによる違いを比較すると、50 メッシュでは幾何学的透過率が高いことから n_e も高く、 n_e の増加と連動して負イオン生成量が増えたと考えられる。磁気フィルター法を用いた場合は、図2に示すプラズマ状態からも予測されるように、負イオン生成は少なく、従って引出し負イオン電流も小さい。

磁気フィルター法での負イオン電流はグリッドバイアス法と比較して低くなっており、限られた実験条件下ではあるが、RF放電プラズマ中での負イオン生成高効率化にはグリッドバイアス法が有力であることが確認できた。

参考文献

1) Y. Nakao et al.: Proc. 6th Inter. Conf. Reactive Plasmas / 23rd Symp. Plasma Processing (2006), pp. 185-186.

- 2) O. Fukumasa and S. Mori: Nuclear Fusion **46** (2006) S287.
- 3) Y. Tauchi and O. Fukumasa: IEEE 30th Inter. Conf. Plasma Science, 2PA16 (2003).
- 4) K. Kato, S. Iizuka and N. Sato: Appl. Phys. Lett. **65** (1994) 816.
- 5) S. Iizuka, K. Kato, A. Takahashi and N. Sato: Jpn. J. Appl. Phys. **36** (1997) 4551.

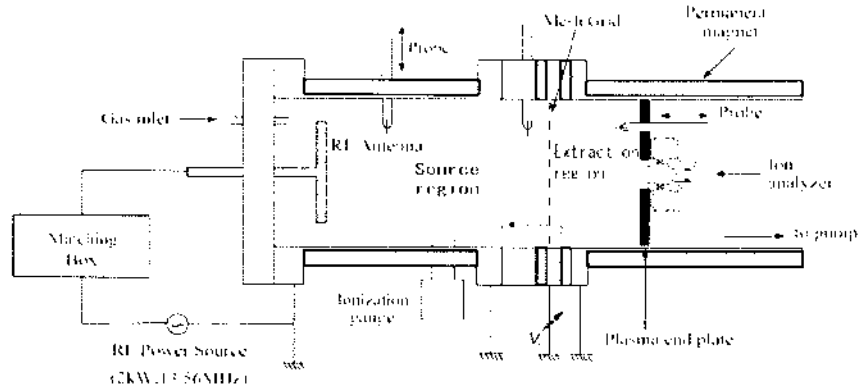


図1 RF負イオン源の概略図

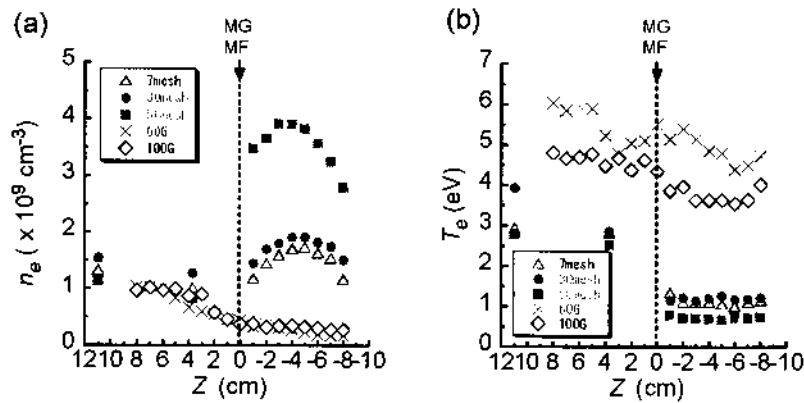


図2 プラズマパラメータの軸方向分布：(a) n_e , (b) T_e .

実験条件： $P_{RF} = 200W$, $p(H_2) = 3 \text{ mTorr}$, $Da = 12cm$, $V_g = -50V$, エンドプレート位置 $Z_{end} = -10.5cm$.

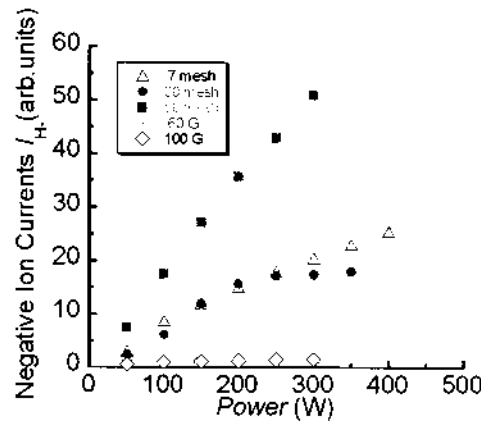


図3 引出し負イオン電流の放電電力依存性

実験条件： $p(H_2) = 3 \text{ mTorr}$ (グリッドバイアス法), 2 mTorr (磁気フィルター法), $Da = 12cm$, $V_g = -50V$, $V_{EX} = 1 \text{ kV}$, $Z_{end} = -4 \sim -6cm$ (グリッドバイアス法), $-4cm$ (磁気フィルター法).

九大スフェリカルトカマク装置におけるプラズマ電流立ち上げの研究

九州東海大学 産業技術研究所 御手洗 修

1. 目的

スフェリカルトカマク核融合炉ではセンターソレノイド (CS) が設置できない可能性が高いので、現在の装置で CS なしプラズマ電流立ち上げの実験研究を行っておく必要がある。しかしながら、CS がなければ初期のプラズマ電流生成が困難なので、実際の ST 実験装置では CS コイルを取り付けておいた方がリスクが小さい。本共同研究は QUEST (主半径 $R=0.68$ m, 小半径 $a=0.40$ m, アスペクト比 $A=1.7$, トロイダル磁場 $B_t=0.25$ T, プラズマ電流 $I_p=300$ kA) における, [1] オーミック放電, [2] オーミック立ち上げと RF による電流駆動, [3] 垂直磁場と RF 加熱, PF4-13 とキャンセルコイルによるマーキングによるプラズマ電流立ち上げと維持, について調べることを目的としている。本年度は[1] [2]のテーマに関して、軸方向に長いセンターソレノイド (PF4-2 と PF4-1, PF4-3 を直列接続) と短いセンターソレノイド PF42 の場合について、かつブレイクダウンを容易にするためのキャンセルコイルを接続した場合について検討した。

2. キャンセルコイル

キャンセルコイル (CC) は、PF4-2 コイル電流と直列に流しプラズマ電流立ち上げ時の PF4-2 コイル電流による漏れ垂直磁場をキャンセルする。(1) プラズマブレイクダウン時にヌル点を作るので PF2 コイルに両極性電源がなくてもすむ。(2) PF4-2 からの漏れ磁場がなくなるので、プラズマ電流一定のとき、オーミック放電でパルス時間を長くしても、垂直磁場 PF2 コイル電流を増大させる必要がなく一定でよく、制御が簡単。(3) 100 kA の定常運転時の平衡に必要な PF2 の起磁力を若干補うことができる。(4) プラズママーキング実験が今までの MAST や UTST とは異なりさらに改善した配位でできる可能性がある。すなわち、このキャンセルコイルによって、ブレイクダウン、オーミック放電、定常放電時の問題点を緩和できるとともに、さらに進んだマーキング実験が期待できる。

3. 計算結果

3.1. 長い CS を用いたオーミック放電

PF4-2, PF4-1, PF4-3 を直列に接続すると長い CS コイルとなる。漏れ磁場が少ないのでキャンセルコイルの巻き数は5巻きと少なくてもよい。サポートの構造も考えて実際に設置できる箇所においたキャンセルコイルの巻き数とヌル点の位置の計算結果を図1に示す。この場合、RF の共鳴点は 0.54m の位置にできるが、トロイダルドリフトによる電場の結果プラズマはトラス外側に (CPD の場合 20cm 程度) 広がるので、0.68m にヌル点を作ってもプラズマは十分に存在すると考えられる。その結果、キャンセルコイルを5巻に選んでおけば、オーミック放電中に CS の漏れ磁場を補正する必要がなくなり制御が楽になる。キャンセルコイルの3次元イメージ図を図2に示す。

キャンセルコイルの位置は少し異なるが、そのときの放電波形を図3に示す。CS の漏れ磁場を打ち消しているので PF4-2-1-3 電流が増加しても、垂直磁場コイル電流 PF1, PF2 は一定でよい。また、パルス長さは CS の磁束のみによってきまる。キャンセルコイルがない場合は、PF1, PF2 コイル電流を時間とともに増大させる必要があり、それらの最大値でパルス長さは決まる。

3.2. 短い CS を用いたオーミック立ち上げ, RF 定常維持放電

EBW 電流駆動のためには、EBW 波がプラズマ中に入りやすいように、オーミックで立ち上げ、早い段階で密度勾配を作り、最適条件を探せるようにしておかねばならない。即ち、いろいろなプラズマ条件を作れるようにしておくことが未知数の多い EBW 入射実験では重要である。PF4-2 コイルとキャンセルコイル (7 巻) 電流を最初逆極性側にふりブレイクダウンを起こし、電流駆動と PF1 コイルの垂直磁場からの寄与も利用して 100kA まで立ち上げ、その後電流駆動効率 $\eta_{CD}=2.0 \times 10^{18}$ A/W²/m, 加熱駆動パワー 500 kW で、100 kA 程度のプラズマ電流を維持するシナリオが考えられる。プラズマ電流立ち上げフェーズでは PF2 コイル電流の変化が電源電圧の制約によって小さいことが予想されるので、変化の速い PF1 コイルでまず

プラズマの位置を制御し、その後 PF2 コイル電流が立ち上がってきたら、PF1 コイル電流を下げて平衡をとることが考えられる。この間 PF1, PF2 コイルによる磁場曲率ではあまり垂直位置安定化が期待できないので、水平磁場コイルによる上下位置制御が重要になると考えられる。このことから水平磁場コイルをキャンセルコイルとして使用することは避けねばならない。また、PF4-1 と PF4-3 コイルの電源電圧が足りないため、他のコイルでダイバータ配位を作った後に、ゆっくりと増大させ最終的な配位に持ってゆく。なお、PF2 コイルのインダクタンスが大きいので、その電源電圧とも絡んでさらに詳細な解析が必要である。その結果によっては電源電圧の増強も視野に入れておく必要があるかもしれない。これらの電源電圧の制約をまだ考慮していない場合の放電波形を図4に示す。

3.3. PF4-1, 3 とキャンセルコイルを用いたマーキング実験

PF4-1, PF4-3 とキャンセルコイルを用いて上下に2つのヌル点を作り、そこにプラズマ電流を誘導して作り、それをダイバータコイルで押して、マーキングさせる。同時に垂直磁場を印加しプラズマ平衡をとりつつ、プラズマ電流を増大させる。キャンセルコイルを5巻にすると図5に示すように共鳴点とヌル点が一致する。ヌル点を0.68mに作るには3巻にする必要があるが、コイルを安価にするためにこれは選択しない。このときの各コイル電流の想定波形を図6に示す。

4. 結果と考察

キャンセルコイルの役割は PF2 コイルの起磁力の増強計画等によって若干の役割減少はあるものの、実験初期のブレイクダウン時には大きく貢献し、プラズマ電流立ち上げを容易にし、かつ運転制御を簡素にし、EBW 電流駆動の運転領域拡大に大きな役割を果たすものと考えられる。また、マーキング実験でもより進んだタイプの実験が可能となるなど QUEST の核心部分を占める重要なコイルになると考えられるので、最優先で設置することが望まれる。なお、電源電圧の制約をまだ考慮していないので、早急に考慮した上で運転シナリオを再構築する必要がある。

5. 研究成果報告

6. 研究組織

所内世話人：中村 一男 教授

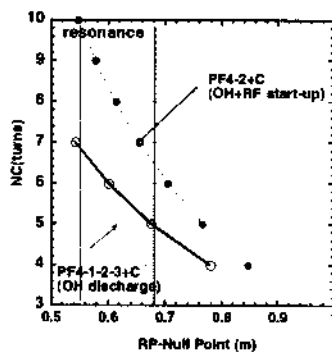


Fig. 1. キャンセルコイルの巻数とヌル点の関係
(コイル中心位置：R=1.7 m, H=1.15 m)

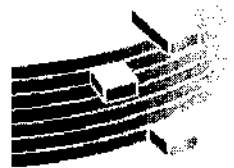


Fig. 2. キャンセルコイルの3次元イメージ

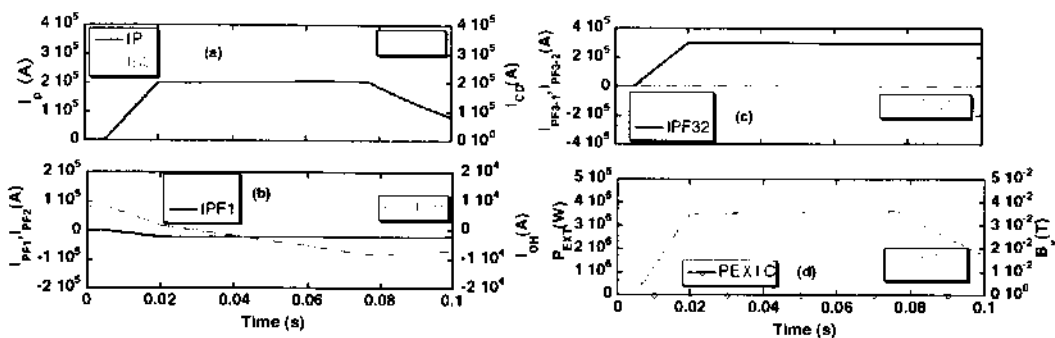


Fig. 3 PF4-2+PF4-1+PF4-3+CC 直列接続CS の場合のオーミック放電波形

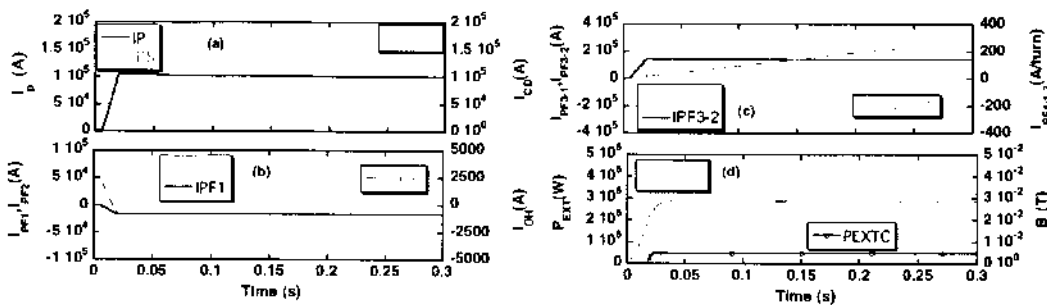


Fig. 4 PF4-2+CC 直列接続CS の場合のオーミック立ち上げによるRF定常維持電流波形

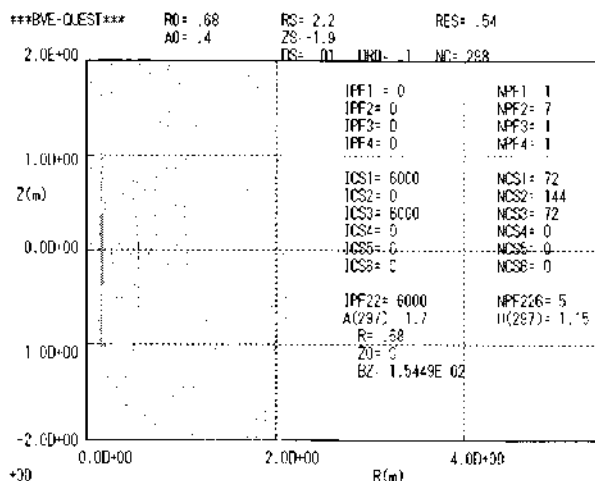


Fig. 5 マージング実験におけるヌル点
(キャンセルコイル5巻のとき共鳴点0.54mに
ヌル点ができる)

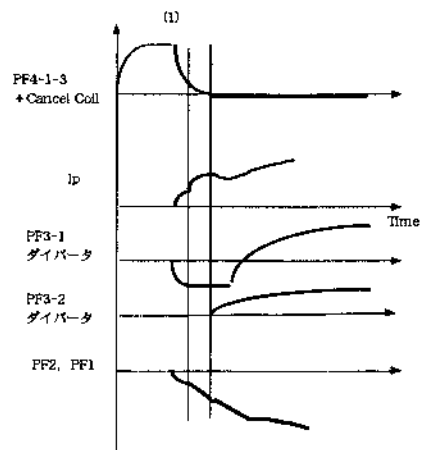


Fig. 6 マージング実験における
CS-less 立ち上げ運転シナリオ
の各コイル電流想定波形

重イオン照射された鉄合金の硬さ変化に及ぼす添加元素の影響

(財) 電力中央研究所 土肥謙次、野本明義、西田憲二、曾根田直樹
九州大学応用力学研究所 渡辺英雄

1. 目的

高経年化した軽水炉の圧力容器 (RPV) 鋼や核融合炉の第一壁など高照射を受ける構造材料用フェライト鋼の照射脆化を精度良く評価するには、点欠陥集合体及び固溶元素クラスタの形成メカニズムを明らかにする必要がある。本研究では中性子照射と類似のカスケード損傷を導入する重イオン照射によって鉄合金のクラスタ形成に及ぼす固溶元素、特にシリコン、ニッケル、マンガンの影響を微小硬さ変化に基づき調査し脆化メカニズムに関する基礎的知見を得ることを目的とする。九州大学応用力学研究所に設置された高エネルギーイオン発生装置は鉄イオンが安定して照射できることに加え、独自の透過電子顕微鏡 (TEM) 用試料ホルダーによる即時試料交換及び試料加熱が可能である。本年度は同設備を用いて鉄イオン照射を行った後、電中研に設置の超微小押し込み硬さ試験機による硬さ測定を行って照射に起因する硬さ変化から合金添加元素の影響を検討した。

2. 実験方法

供試材に用いた鉄合金は、Si、Ni、Mn、Cu を添加した Fe-0.6Ni-0.2Si、Fe-0.6Ni-0.7Mn-0.2Si、Fe-0.6Ni-0.7Mn-0.2Si-0.1Cu (元素記号の前の数値は添加量 (wt%) を表す) の三合金である。何れも高純度電解鉄をベースに熔解・調製し、1200℃高温圧延後 900℃ x 30 分加熱及び空冷冷却処理を行った。合金は実用 RPV 鋼の転位を模擬するため、圧下率 5% の冷間圧延処理を行い、TEM ディスク (φ 3mm、0.2mm²) を試料とし、電解研摩法により表面を鏡面仕上げとした。

重イオン照射は、専用 TEM ホルダーに試料を装着後、高エネルギーイオン発生装置に設置し、2.4MeV の Fe²⁺イオンを、室温及び 288℃の試料温度に調整後、それぞれ 0.01 及び 0.1dpa の損傷量まで照射を行った。照射後、電中研へ輸送し超微小押し込み硬さ試験機 (エリオニクス社製 ENT-1100a) を用いて、最大荷重 1000mgf にて最大 9 点の硬さ測定を実施した。測定後の硬さ値は、荷重/変位を縦軸、変位を横軸とする測定曲線の試料表面より 50~150nm の範囲の傾きの平均値から算定した。また、このようにして求めた微小硬さ値は、基準片 (純鉄) のビッカース硬さ試験から求めた換算係数からビッカース硬さ値へ換算した。

3. 実験結果

図 1 に室温及び 288℃照射材のビッカース硬さ換算値の損傷量依存性を示す。まず、基準片 (純鉄) のビッカース硬さ (約 80) と比べ、何れの合金も 5%冷間圧延により未照射で硬さが増加しているが、合金間の違いは殆どない。何れの合金種及び照射温度でも損傷量の増加に伴い、明瞭に硬さが上昇することがわかる。

図 2 に室温及び 288℃照射材のビッカース硬さ上昇量 (換算値) の損傷量依存性を示す。室温照射では、0.01dpa まで合金間の硬さ上昇量の違いは認められないが 0.1dpa では Fe-0.6Ni-0.2Si 及び Fe-0.6Ni-0.7Mn-0.2Si 合金の間では有意な差はなく、唯一 Cu を含有する Fe-0.6Ni-0.7Mn-0.2Si-0.1Cu 合金で僅かに硬さ上昇量は小さくなっている。このことから、室温照射では Fe-0.6Ni-0.2Si 合金への

Mn 及び Cu 添加の影響は少なくとも殆ど認められない。一方、288℃照射では、Fe-0.6Ni-0.7Mn-0.2Si-0.1Cu 合金が他の2合金よりも何れの損傷量で硬さ上昇量が大きくなっており、Cu を添加することの効果は明瞭に現れている。また照射温度の影響について、Fe-0.6Ni-0.7Mn-0.2Si-0.1Cu 合金では殆ど効果が現れていないのに対して、他の2合金では高温照射の方が硬さ上昇量は明らかに小さくなっている。このことは、288℃照射では照射欠陥の形成及び熱的回復に起因する欠陥残存率が室温照射に比べ低いものの、Cu 添加合金では Cu を含有する欠陥クラスターが形成されることにより見かけ上照射温度の影響が現れない結果になっているものと考えられる。

4. まとめ

本研究では、5%冷間圧延した鉄合金への鉄イオン照射による硬さ変化を調べることで、添加元素の影響を調べた。その結果、何れの鉄合金も損傷量の増大により明瞭な増加を示すが、Fe-0.6Ni-0.2Si 及び Fe-0.6Ni-0.7Mn-0.2Si 合金とも合金間の差は殆ど認められず、Cu を含有する Fe-0.6Ni-0.7Mn-0.2Si-0.1Cu 合金では 288℃照射において硬さ上昇量が大きくなることがわかった。

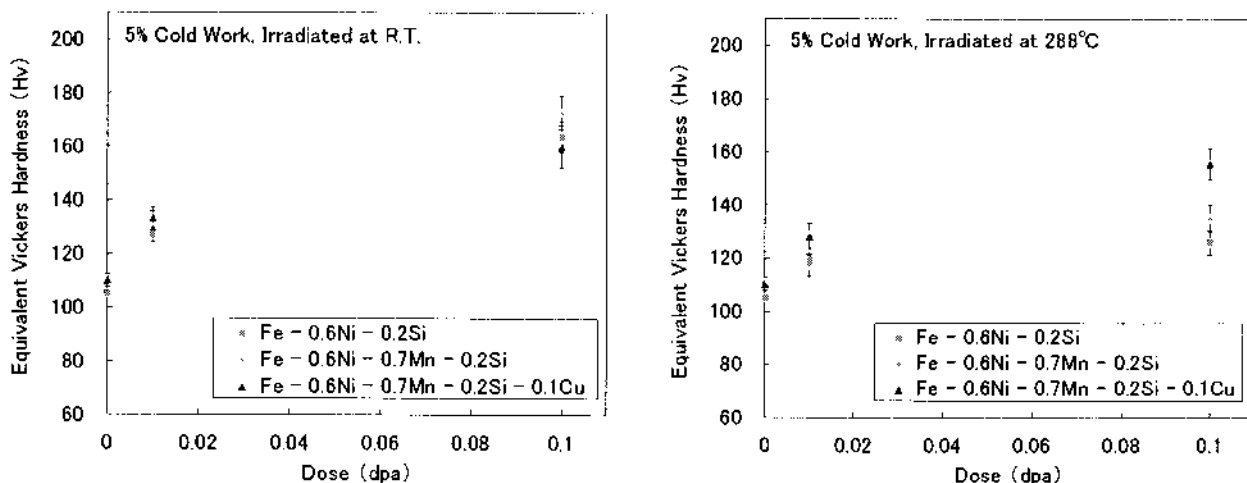


図1. ビッカース硬さ（換算値）の損傷量依存性.

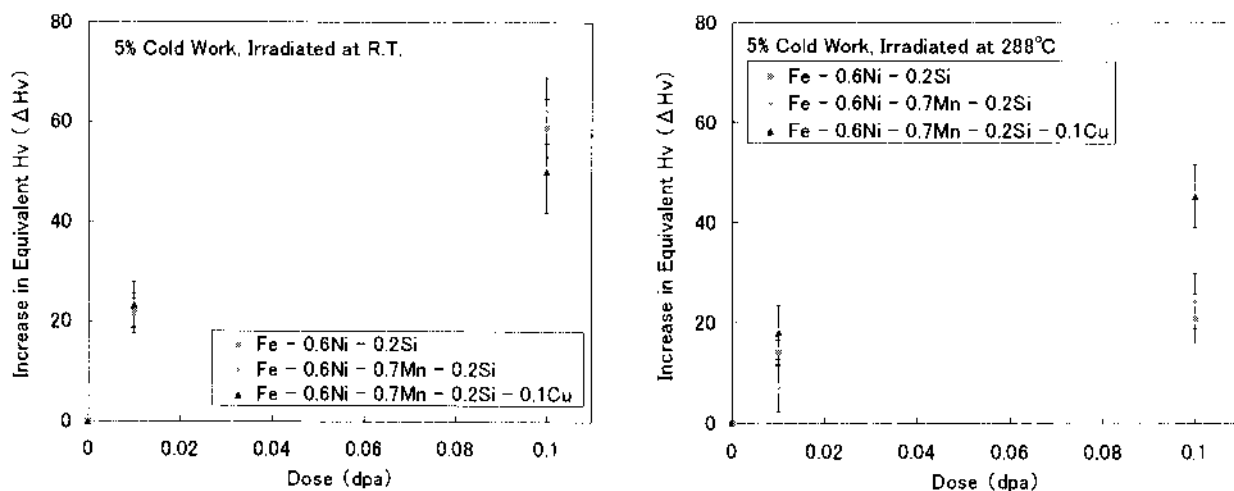


図2 ビッカース硬さ上昇量（換算値）の損傷量依存性.

プラズマ実時間制御を考慮したプラズマ断面位置形状再構築システム(CCS)の ST 装置への適用検討

独立行政法人日本原子力研究開発機構 栗原研一、川俣陽一、末岡通治
九州東海大学 御手洗 修

目的

本研究は九大応力研プラズマ実験装置、小型PWI実験装置(小型ST)、計画中の新STの検討に伴い、プラズマ位置・断面形状の高精度平衡制御系の構築を目指すものである。その手法として日本原子力研究開発機構 JT-60 で現在稼動中である「CCS(コーシー条件面)法」を用いた実時間プラズマ断面形状再構築動画可視化システムを小型 ST、および新 ST へ応用するための検討、システム設計の提案を行うものである。

研究の具体的方法

研究対象としては、原子力機構 JT-60 での CCS 法を用いた実時間プラズマ断面位置形状再構築システムを小型ST、および新STへの適用に向けて、引き続き以下の検討を行う。

- ①計算機中で平衡配位を作成し、現状のセンサー数、位置のもとでの CCS 法の精度を検討。
- ②以上を踏まえたシステム構築設計を実施する。

結果概要

①CCS 法の精度検討

計算機中で平衡配位を作成し、現状のセンサー数、位置のもとでの CCS 法の精度検討を行った。センサーは、図1に示すように磁束ループ計測、磁場計測を用いた。

このセンサーに対して、予め平衡解析コード(ECODE)を用いて正解の位置形状が分かったプラズマの場合の信号を計算しておき、その信号を入力として CCS 計算に与え、得られる形状、磁束分布などを正解と比較することで評価検討を行った。その例を図2に示す。

このように、CCS 法の結果は、非常に高精度で小型 ST プラズマを再構築出来ている。両者の誤差は 1%未満である。また、センサーの種類や数を変えた場合でも、同様に精度良く再構築できていることが判る。

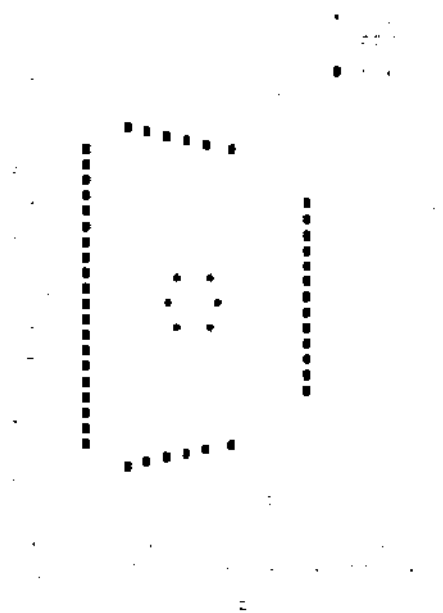


図1 装置体系とセンサー配置例

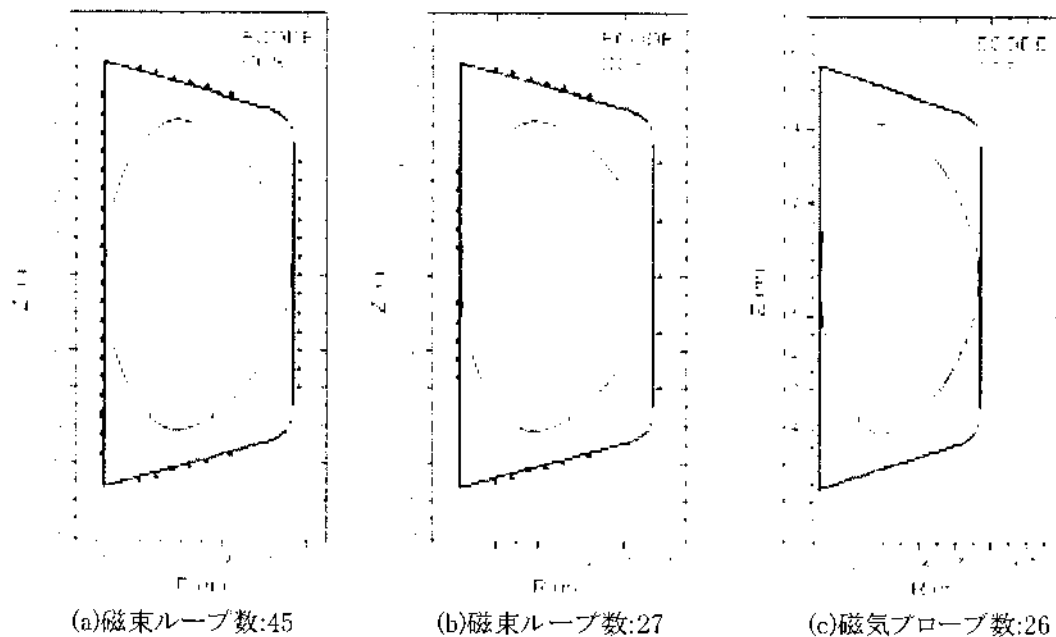


図2 平衡コードと CCS との再構築結果比較

②実時間プラズマ断面形状再構築／動画可視化システム設計の提案

図 3 に現在、JT-60 で稼動中の「実時間プラズマ断面形状再構築動画可視化システム」の構成を示す。CCS 法による演算ロジックを組込んだ PCI バスシステム(6 台)は、電磁気センサー信号(磁気プローブ、磁束ループ)とポロイダル磁場コイル電流信号を入力後、並列動作しプラズマ断面形状の再構築を最長 1.0ms 周期の実時間で計算処理している。同時に、プラズマ断面形状の再構築時に得られるプラズマ位置形状パラメータを基に汎用 OS パソコン 1 台でプラズマ断面形状を実時間動画可視化(約 16ms/1フレーム)を行っている。この実時間制御におけるデータ通信は RM(リフレクティブメモリ:VME/PCI,VMIC5576, 256KB, 6.2MB/s, VMIC 社製)を用いている。

本システムを九大応力研プラズマ実験装置、新 ST へ適用することを提案する。

Real-Time Plasma Shape Reproduction System(CCS)

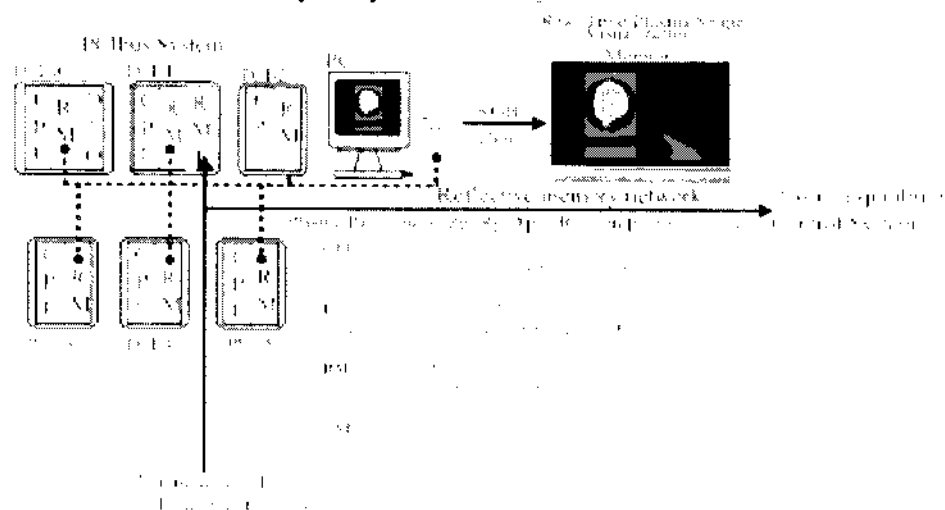


図 3. CCS 法を用いた JT-60 実時間プラズマ断面形状再構築動画可視化システム

1. 研究背景と目的

疲労破壊は安定破壊の範疇に分類されるが、S-N 曲線を用いた寿命評価法には疲労破壊を不安定破壊と考えているという矛盾がある。研究代表者らは、健全部からの疲労き裂発生メカニズムを転位論的考察に基づいて提案し、無欠陥状態部から任意の大きさになるまでのき裂成長曲線を統一的に評価する手法 [1] を確立した。同モデルではき裂発生初期段階を「塑性変形による $\rightarrow$ 剪断モードき裂の出現 $\rightarrow$ き裂開口モードの出現」と考えているが、現時点でこれは仮定に過ぎない。一方、全寿命に及ぼすこの段階の割合は小さいため、寿命予測精度の向上にはこの段階の定量的予測が不可欠である。そこで、負荷過程中的疲労き裂成長を連続的に直接観察してモデルの妥当性検証を目指した。なお、昨年度までの研究で、提案モデルの一定荷重振幅下における有用性の確認を行ったが、実働構造物・機器に作用する荷重は、通常、変動荷重であるため、提案モデルが変動荷重履歴下においても有用であることを検証することが極めて重要である。応用力学研究所は、本研究の遂行に不可欠な機器である動的疲労観測装置 (SEM 内疲労試験機) を有しており、これを利用して研究を実施した。

2. 観察方法

検討対象材料より切欠 (半径 0.5mm) を一端に導入した試験片を製作し、SEM 内疲労試験機を用いて疲労試験を実施し、切欠底から発生・伝播する疲労き裂を撮影・観測した。板表面の観察によりモデル化の妥当性を検証するためには、出来るだけ板厚を薄くする必要があり、板厚方向に結晶粒が 2~13 個程度しか含まない厚さまで研磨を行い試験片の減厚を行った。供試材は大型溶接鋼構造物での使用頻度が大きい溶接構造物用圧延材料 (SM400B) である。

3. き裂成長シミュレーション

実験に先立ち、疲労き裂成長シミュレーションコード FLARP を用いて、実験条件と同様の荷重履歴下におけるき裂成長曲線の推定を行った。作用応力範囲及び推定されたき裂成長曲線を図 1、図 2 に示す。図 2 には、一定振幅荷重条件下で実測されたき裂成長曲線を黒丸で、FLARP により推定されたき裂成長曲線を破線で示している。図 1 の荷重履歴に対応するき裂成長曲線は実線で示しているが、応力範囲が減少に伴いき裂伝播速度の遅延が生じることが予想される。

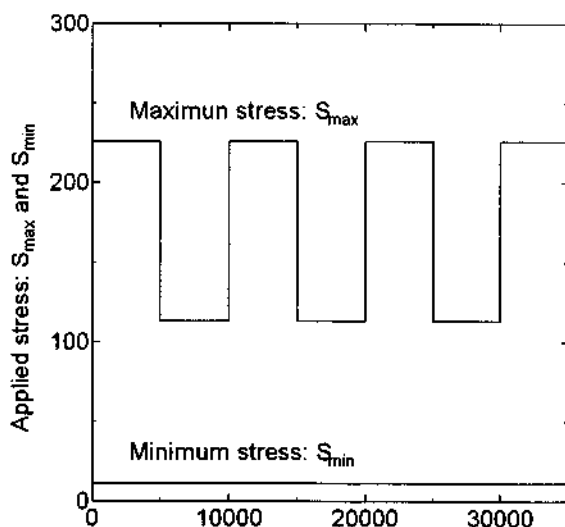


図 1 荷重履歴

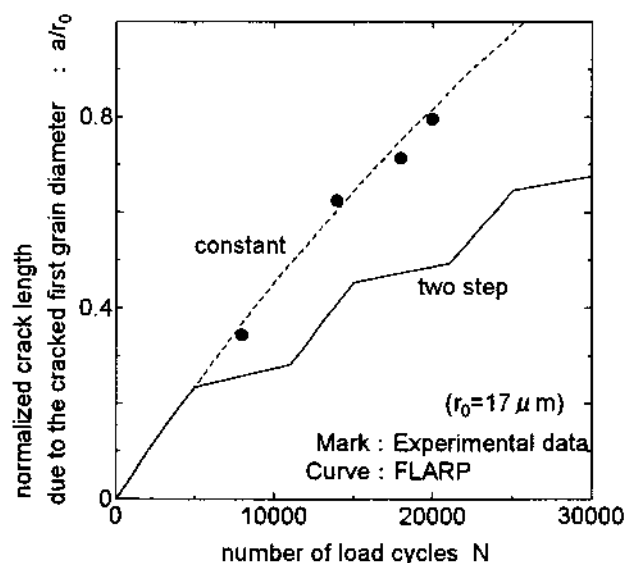


図 2 き裂成長曲線

3. 観察結果

昨年度の観察結果と同様に、切欠底に生じたひびきは荷重軸とほぼ 45° 方向に生じていた事を確認した。また、通常言われている疲労き裂発生機構と同様の形態でき裂が成長していたこと、Hanson らの提案した刃状転位とひび線成長に基づく最初の結晶粒内におけるせん断型疲労き裂成長モデル[2]による結果と同様に、結晶方位や初期ひび線発生角度次第で屈曲型のき裂成長経路をとりながら疲労き裂が成長していたことが確認された。

しかしながら、今年度の観察では、意図した寸法レベルのき裂（第一結晶粒内をせん断型で進展するき裂）は観察出来ず、き裂を確認した時点では、既に結晶粒径の数倍のき裂長さに達していた。

5. 研究成果と今後の課題

動的疲労観測装置(SEM 内疲労試験機)を用いて鋼材の疲労き裂発生挙動の直接観察を行い、これまでに提案した疲労き裂成長モデルの妥当性の確認を目指したが、試験装置の不調のために、推定結果との比較を行う事が出来なかった。また、疲労試験機稼働中の SEM 分解能の都合上、第一結晶粒内を伝播する疲労き裂を観察する事は容易ではないことも確認出来たので、以下に記述する問題点を克服し、来年度以降に再度実験を行うことを予定している。

- 供試材料の変更：通常の軟鋼は結晶粒径が $30\mu\text{m}$ 程度のため、板厚方向に複数の結晶が並ぶことを防ぐためには、結晶粒径程度まで板厚を減ずる必要がある。また、粒径が小さいため、第一結晶粒内の伝播き裂を発見するのが容易ではない。そこで、結晶粒径が十分大きい（2mm 程度）の一方方向性珪素鋼板から試験片を採取して観察を行うことが有用であると考えられる。
- 応力集中限の限定：これまでに使用してきた試験片では、放電加工により 0.5mm の半円状切欠を導入し、これをき裂発生領域としてきたが、これではき裂発生領域が広いため、き裂を発見したときには、観察を意図している微視き裂の寸法以上になっていることが多かった。この対策としては、切欠半径をより小さくすることが必要である。そのために、集束イオンビーム加工を用いて、十分小さな切欠を導入することを検討する。
- 試験装置の荷重追従性：予備試験を十分行い、試験装置の荷重追従性がより良くなるような加重ゲイン設定を確定させた上で、本試験を行う。（今年度は、板厚を十分薄くした試験片を多数用意出来なかったため、予備試験が十分に実施できなかった。）

6. 研究組織

（研究代表者） 後藤浩二，九州大学大学院工学研究院海洋システム工学部門助教授
豊貞雅宏，九州大学大学院工学研究院海洋システム工学部門教授
村上幸治，九州大学大学院工学府建設システム工学専攻技術職員
堤成一郎，九州大学大学院工学研究院海洋システム工学部門助手

参考文献

- [1] Toyosada, M., Gotoh, K. and Niwa, T., Fatigue Life Assessment for Welded Structures without Initial Defects: An Algorithm for Predicting Fatigue Crack Growth from a Sound Site, International Journal of Fatigue, Vol.26, No.9, 2004, pp.993-1002
- [2] Hansson, P. and Melin, S., Dislocation-based modeling of the growth of a microstructurally short crack by single shear due to fatigue loading, International Journal of Fatigue, Vol.27, 2005, pp.347-356

本研究の目的

本研究では小型PWI装置に既設の8.2GHz RF入射システムを用いて、電子バーンシュタイン波(B波)による高密度プラズマの電子サイクロトロン加熱／電流駆動(ECH/ECCD)を行なうための最適な電磁波入射条件の検討を行なうことを目的とする。電磁波とB波の間のモード変換効率、モード変換領域の密度勾配と磁場強度、密度変化方向に垂直な屈折率成分の関数として定まる。小型PWI装置で実現され得るプラズマパラメータ領域を探索し、どのような入射条件がB波への高変換効率を得るのに最適かを検討する。

研究の方法

1次元スラブモデルにおいて、電磁波とB波間のモード結合を記述する散乱行列を求める数値計算コードを行うことで、様々なプラズマの境界パラメータにおいてモード変換過程の特徴を探索できる。この探索結果を用いて、小型PWI装置のプラズマ境界パラメータではどのような電磁波入射条件がB波への高変換効率を得るのに最適化を調べる。

結果

中心磁場 $B_0=0.25\text{T}$, 大半径 $R_0=0.3\text{m}$, 小半径 $a=0.2\text{m}$ のプラズマにおける、8.2GHz RF システム($200\text{kW} \times 2$ 系統)をマイクロ波源とした基本共鳴周波数による赤道面付近での波動伝播、加熱を想定する。スラブモデルを適用する必要があるため、パラメータの変化方向を x 軸方向とし、これをほぼ大半径方向とみなす。また、プラズマ境界での磁場方向を z 軸方向とする。ポロイダル磁場が無視できるとすると、これはトロイダル磁場とみなすことができる。密度変化方向に垂直な屈折率成分は、 N_y, N_z となるが、これらの値はスラブモデルでは不変量となり、同じ (N_y, N_z) を持つ EBW と電磁波モードがモード変換を介して結合することとなる。 N_z が磁場に平行方向の屈折率 $N_{//}$ に対応する。図1の横軸と縦軸はそれぞれ、プラズマ遮断における真空中の波長 λ_0 で規格化した密度勾配長 $L_n/\lambda_0 (L_n=n/(dn/dx))$, 電子サイクロトロン周波数 Ω で規格化した波の周波数 ω/Ω , である。モード変換領域の磁場が強く、 $\omega/\Omega=1$ 近傍となる場合以外はこのようにプラズマ遮断におけるパラメータをモード変換の性質を特徴づける指標として用いることができる。ここに $N_z=0$ で N_y のみ最適化して異常波を入射する場合のモード変換効率の数値計算結果を等高線表示する。 $N_z=0$ の場合の異常波の偏波は直線偏波である。等高線分布より、 $N_z=0$ で N_y のみ最適化し異常波を入射する方法が有効なパラメータ領域は、 L_n/λ_0 が小となる密度勾配が急峻な領域(Perp-X 領域)であることがわかる。また磁場強度が大きい程、より密度勾配が急峻な領域でこの方法が有効である。この図においてモード変換効率が10%以下の領域は、 $N_y=0, N_z=N_{//\text{opt}}=(\Omega/(\omega+\Omega))^{1/2}$ での正常(O)波入射法、いわゆる O-X-B 法が有効な領域(OXB 領域)にほぼ一致する。また、Perp-X 領域と OXB 領域に挟まれたパラメータ領域(g1 領域)では、 N_z, N_y ともにプラズマパラメータごとに最適化し、偏波も O 波と X 波を強度比と相対位相を最適化して混合入射する必要がある。 L_n/λ_0 が小さく非常に密度勾配が急峻な領域(Frosted 領域)では、どのような入射方法をもってしても高変換効率を得られない(文献[1]参照)。小型PWI装置での様々な密度分布形状を仮定し、それぞれの場合にプラズマ遮断でのパラメータ点、 $(L_n/\lambda_0, \omega/\Omega)$ がこの図上のどの領域に位置するかを調べ、最適入射方法を検討した。図1に仮定した密度分布の一例を示す。分布形状はパラボラ分布、 $n_e=n_0 (1.0-((x-x_0)/a)^2)$ とした。 x_0 はプラズマ中心の座標($x_0=R_0=0.3\text{m}$)である。 a は小半径に対応するとして、 0.2m とした。磁場は z 軸方向で $B_z=B_0(x_0/x)$, $B_0=0.25\text{T}$ とした。中心密度 n_0 をそれぞれ $2, 4, 6, 8 \cdot (10^{18}\text{m}^{-3})$ とした場合のプラズマ遮断におけるパラメータ点 $(L_n/\lambda_0, \omega/\Omega)$ を図1中にプロットした。中心密度が低い場合は OXB 領域にあるが、高くなると g1 領域に移っていく。すなわち、中心密度が $2\sim 4 \times 10^{18}\text{m}^{-3}$ 程度の場合は OXB 法を用いれば良いが、中心密度がさらに高くなり密度勾配が急峻になると、O 波 X 波の最適混合波入射の必要性が生じることがわかる。密度分布形状を $n_e=n_0 (1.0-((x-x_0)/a)^p)$ とし、中心密度 n_0 と、係数 p の値を変えた場合についても調べた。図3に密度分布形状を示す。同じ中心密度でも分布形状によって、プラズマ遮断での密度勾配が異なる。図4に $n_0=2.0 \times 10^{18}\text{m}^{-3}$ の場合について、それぞれ $p=2, 4, 6, 8$ の

場合のプラズマ遮断でのパラメータを標した。係数 p が大きくなるとパラメータ点は OXB 領域から g1 領域へと移動する。すなわち中心部の平坦領域が広いプラズマが生成されると $n_{e0}=2 \times 10^{18} \text{m}^{-3}$ でも O 波と X 波の混合入射が必要となる場合があり得ることがわかる。また、中心密度が倍の $n_{e0}=4 \times 10^{18} \text{m}^{-3}$ になると、より混合波入射の必要性が増すことがわかる。

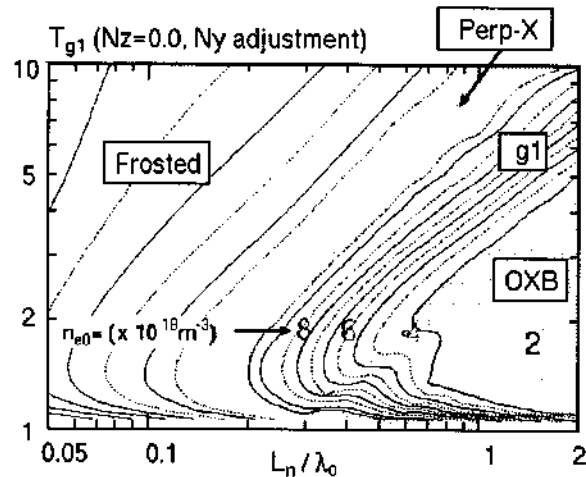


図1: 横軸 L_n/λ_0 、縦軸 ω/Ω としたパラメータ領域図。 $N_z=0$, N_y 最適化、異常波入射の場合のモード変換効率を等高線表示した。モード変換効率 95%以上の領域を赤、10%以下の領域を緑で示す。図2で示す分布で $n_{e0}=2, 4, 6, 8 \times 10^{18} \text{m}^{-3}$ の場合のパラメータ点を数字 2,4,6,8 で標す。

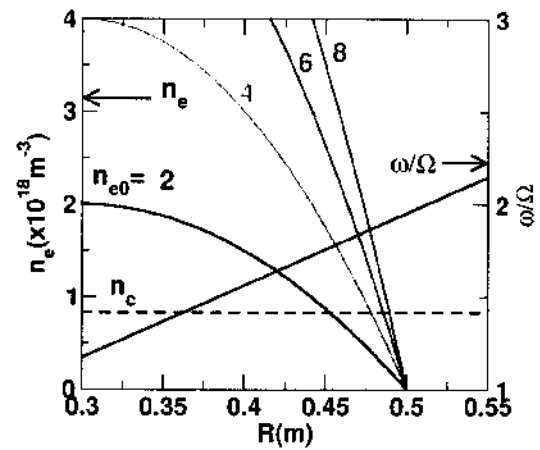


図2: 検討のために仮定した密度分布 $n_e=n_{e0} (1.0 - ((x-x_0)/a)^2)$ 、と規格化した磁場強度分布。

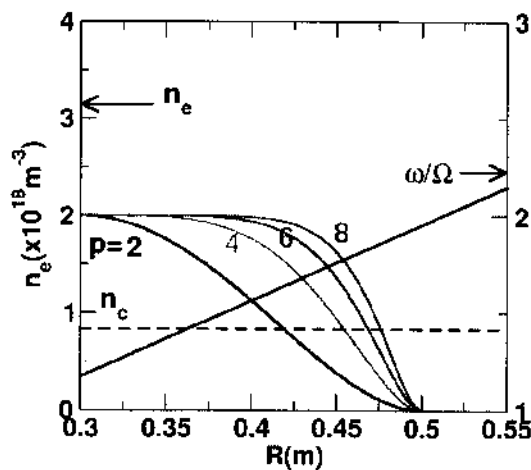


図3: $n_e=n_{e0} (1.0 - ((x-x_0)/a)^2)$ で表される密度分布。 $n_{e0}=2.0 \times 10^{18} \text{m}^{-3}$ の場合の各分布を示す。規格化した磁場強度分布は図2の場合と同じ。

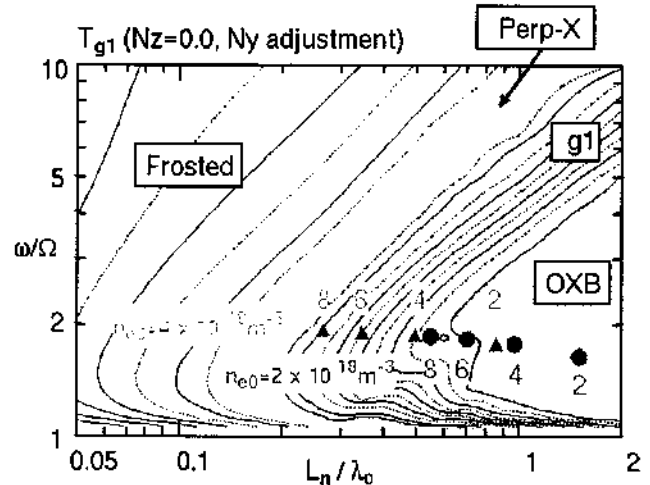


図4: 図1と同様の図、 $n_{e0}=2.0 \times 10^{18} \text{m}^{-3}$, $p=2,4,6,8$ の場合のパラメータ点を○で、 $n_{e0}=4.0 \times 10^{18} \text{m}^{-3}$, $p=2,4,6,8$ の場合のパラメータ点を△で標す。

小型PWI装置では、実現されるプラズマの密度分布形状によってはO波とX波を強度比と相対位相を最適化して混合入射することがB波への高変換効率を得るために必要となる。任意偏波入射可能、入射角可変領域に幅のある入射系を構築することが望ましい。

文献[1] H.Igami et al., *Plasma Physics and Controlled Fusion* vol48(2006), pp.573-598

中性粒子ビームを用いた球状トカマクプラズマの制御方式の検討

産業技術総合研究所・エネルギー技術研究部門 榊田 創

・目的

将来の核融合プラントにおいて、高温プラズマの定常化研究は重要なテーマの一つとなっている。特に、応用力学研究所においては球状トカマク（ST）装置の定常プラズマ運転の研究環境を立ち上げているところである。そこで、ST 装置の高温プラズマの生成・保持及び非誘導型の電流駆動方式の可能性を探る手法の一つとして、更には、イオン温度及びプラズマ速度分布の計測手法として中性粒子ビーム入射が有効と考えられている。

ST 装置への中性粒子ビームの効率的な入射の為には、対象とする ST 装置固有の特色に合わせたビームの開発が必要となるが、実験条件によっては対向壁に当該ビームが照射される可能性が懸念される。プラズマ対向材料研究は応用力学研究所における重要な研究テーマの一つとなっていることなどから、高パワー密度のビームが対向材料などに照射された場合の影響などについて調べることを今年度の研究目的とする。

・実験方法

ビームによる対向材料の影響を調べるために、産総研において開発した中性水素粒子ビーム（NBI）装置を用いて照射試験を行った。NBI は、カusp磁場を有したバケット型のイオン源であり、フィラメントとチャンバー間でアーク放電を行いプラズマの生成を行う。ビームの集束性を良くするために加速・減速・接地用の3枚の凹型電極（ ϕ 345 mm）を採用した点が特徴であり、焦点部でのビーム径は約 ϕ 36 mmである。

今回の照射試験では、図1に示すように電圧 ~ 22 kV、電流 ~ 40 A のヘリウムイオンビームを用いた。材料照射部でのビーム径が、70 mm 程度（引き出し電極から 1530 mm の位置）であるので、パワー密度、フラックス、全フラックスは、 $\Gamma = 248 \text{ MW/m}^2$ 、 $6.2 \times 10^{22} \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、 $1.9 \times 10^{21} \text{ m}^{-2}/\text{shot}$ とそれぞれ見積もられる。1ショット当たりのビーム照射時間は 30 ms である。

・実験結果

図2に産総研で開発したビームシステム及びターゲット設置位置を示す。今回用いた材料は、大きさ $16.6 \times 16.6 \text{ mm}^2$ 、厚さ 3 mm の焼結タングステン（純度 99.9 %）であり、無酸素銅

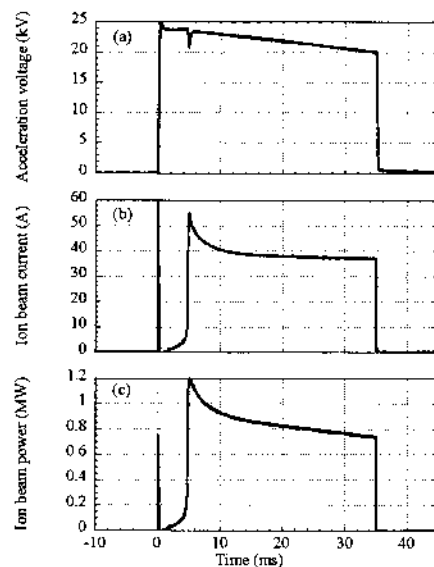


図1. Time evolutions of (a) acceleration voltage, (b) extracted ion beam current and (c) ion beam power.

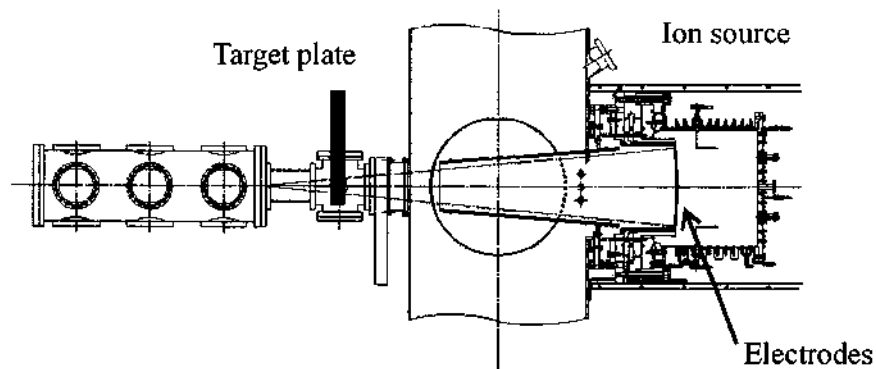


図2. Schematic drawing of ion beam system and a target plate.

のターゲット固定板にタップを切ってあるタングステンの裏面からボルトで固定し、ビームを照射した。タップを切ってある箇所のタングステンの厚さは1 mmである。1ショット当たりのタングステン材料表面の温度は、2689 K 程度と見積もられる。

図3に9分間隔で5ショットビームを照射した後のタングステン表面状態を電子顕微鏡（SEM）にて撮影した写真を示す（倍率1,5000）。図3（a）は、厚さ3 mmの材料にビームを照射した場合の表面の写真である。図に示すように、100 nm以下の大きさの穴があいているのがわかる。図3（b）は、ビームが照射された材料の厚さ1 mmの箇所の表面の写真である。図に示すように、約200 nmの大きさの穴が多数あいているのがわかる。

以上の結果より、材料の厚みが薄い場合は、熱拡散が制限され局所的に温度が上昇しやすくなる傾向があると考えられる。このため、穴径及び穴数は表面温度に大きく依存すると考えられる。

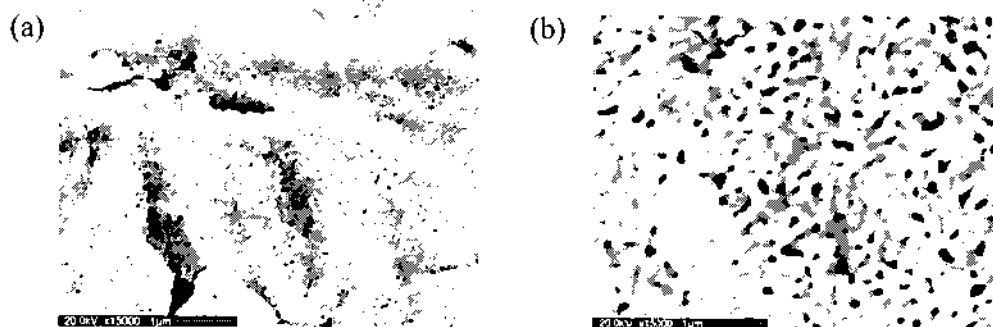


図3. SEM images of the tungsten surface, (a)厚さ3 mm の場合、(b)厚さ1 mm の場合.

・ 成果報告

榊田創他、「高電流密度多種イオンビームを用いた研究展開」、平成18年度逆磁場ピンチ研究会、つくば、2007年3月。

・ 研究組織

産業技術総合研究所・エネルギー技術研究部門：榊田創、平野洋一、小口治久、木山學
九州大学・応用力学研究所：佐藤浩之助、坂本瑞樹

圧力容器鋼の磁気特性に与えるイオン照射効果

岩手大学工学部附属金属材料保全工学研究センター 高橋 正氣

目的

高度経済成長期以降、次々と建設された社会基盤構造物の経年劣化問題が生じている。今日の経済情勢のもとではこれらの全面的な更新は難しく、いかに安全に長期間使用するかという、いわゆる“保全”技術の役割が重要となる。原子力プラントでは、この種の問題として圧力容器鋼の照射脆化があげられる。脆化進行を正確に予測するためには脆化メカニズムの詳細を解明する必要がある、その上で正確な評価技術の開発と確立が必要である。評価法としては、これまでは炉内に装荷した炉壁と同材質のシャルピー試験片を定期的に取り出して衝撃試験が実施されてきた。しかし、原発の長期利用による監視試験片の不足問題が懸念されており、使用済み衝撃試験の溶接による再利用が検討されている。その代替技術の一つとして磁気的非破壊評価法を提案する。

本研究代表者のグループでは、平成 16 年度より原子力機構・材料試験炉 JMTR を用いた中性子照射実験を開始しており、一方、平成 17 年度より米国・カリフォルニア大サンタバーバラ校 (UCSB)Odette グループが所有する中性子照射済み試験片の磁気計測を本格的に実施し、照射損傷試料の機械特性と磁気特性の相関の解明に取り組んでいる。その中で、脆化の進行に伴い、磁気ヒステリシス・マイナーループ係数が減少することが確認された。脆化と磁気特性のこの負の相関メカニズムを明らかにする上で、損傷組織の詳細な評価が重要となる。しかし、中性子照射実験では照射条件が限定される上、試料の放射化のためホットラボでの実験に限定されるなど、幅広い観点から損傷組織評価を行うことが難しい。これらの問題を解決するために、イオン照射や電子線照射を駆使して照射条件を系統的に変えた試料を作製し、通常の実験室環境で扱える高性能・高機能な装置を用いて詳細な損傷組織観察を行う。その上で中性子照射実験の結果と比較しながら、照射損傷組織と磁気特性の関係の詳細を明らかにする。

実験方法

試料として Cu 濃度の異なる 3 種類の原子炉圧力容器鋼 A533B 鋼 (A 材 : 0.05wt.%Cu および B 材 : 0.16wt.%Cu, JRQ 参照材) 及び純鉄を用いた。イオン照射実験では、応用力学研究所のタンデム型加速器を用いて 2.4MeV の鉄イオンを照射した。試料温度を室温から 290°C (商業用原子炉の運転温度) まで変化させ、照射量 0.5~2dpa で照射実験を行った。照射試料を電解研磨した後、透過電子顕微鏡 (TEM) 及び超高压電子顕微鏡 (HVEM) を用いて、損傷部分の組織観察を行った。また超微小押し込み硬さ試験機を用いて、照射前後の試料の硬度測定を行った。並行して、イオン照射実験と同じ試料について、電子線照射による損傷組織の形成過程の連続観察を行った。また、材料試験炉(JMTR)で中性子照射した試料の組織観察も実施した。中性子照射材については、試料周りの励磁・検出コイルをデジタル BH トレーサーに接続しマイナーループを評価した。

結果及び考察

JMTR での中性子照射中その場磁気計測の結果、Cu 濃度の高い A533B 鋼 B 材では照射中期・後期にマイナーループ係数が減少することが明らかにされており、UCSB 照射材でもそれを支持する結果が得られている。磁気パラメータの減少のメカニズムとして、照射欠陥が転位の応力場を緩和する形で転位近傍に生じたと推測した。図 1 に JMTR で中性子照射した B 材の TEM 写真を示す。実際に転位近傍に照射欠陥（転位ループと考えられる）が形成していることがわかり、イオン照射材でも同様の現象が確認された。

圧力容器鋼の照射脆化メカニズムを考えるための基礎実験として、FeCu モデル合金がよく用いられる。図 2 に電子線照射した A533B 鋼 B 材と FeCu モデル合金の TEM 写真を示す。前者では、まず転位近傍に I-型転位ループが形成し、続いてその内側ループが形成して行くのに対し、後者ではマトリクスで比較的均一に I-型転位ループが形成した。即ち、圧力容器鋼とモデル合金で I-型ループ形成のメカニズムが異なることを示している。この原因として圧力容器鋼に含まれるサブサイズ原子が重要な役割を担っていると考えている。

以上をまとめると、A533B 鋼の照射材の磁気特性を考える上で転位近傍での転位ループ形成が重要であること、その形成過程は、圧力容器鋼に特徴的な現象であることがわかった。

成果報告

- (1) H. Watanabe, T. Imamura, N. Yoshida, Y. Kamada, and S. Takahashi.
"The microstructural Evolution in A533B Steels During Fe Ion Irradiation"
The 23rd Symposium on Effects of Radiation on Materials, San Jose, USA, June 13-15, 2006
- (2) 渡辺英雄, 鱒淵俊児, 吉田直亮, 鎌田康寛, 高橋正氣, "A533B 鋼のマトリクス欠陥形成と照射脆化"
第 139 回日本金属学会秋期大会, 2006.9.16-18, 新潟大, 新潟, 概要集 p.123
- (3) 高橋正氣, 鎌田康寛, 菊池弘昭, 小林悟, 荒克之, 海老根典也, 鬼沢邦雄, 鈴木雅秀, 渡辺英雄, 吉田直亮, 中村暢伴, 荻博次 "純鉄および圧力容器鋼の中性子照射中その場磁気計測と照射脆化"
第 139 回日本金属学会秋期大会, 2006.9.16-18, 新潟大, 新潟, 概要集 p.124

研究組織

高橋正氣, 鎌田康寛, 菊池弘昭, 小林悟, 荒克之 : 岩手大学工学部附属金属材料保全工学研究センター, 吉田直亮, 渡辺英雄 : 九州大学応用力学研究所

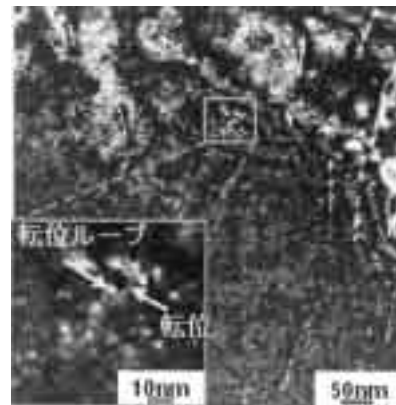


図 1 290℃で中性子照射した A533B 鋼の TEM 写真
B材, $5 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$

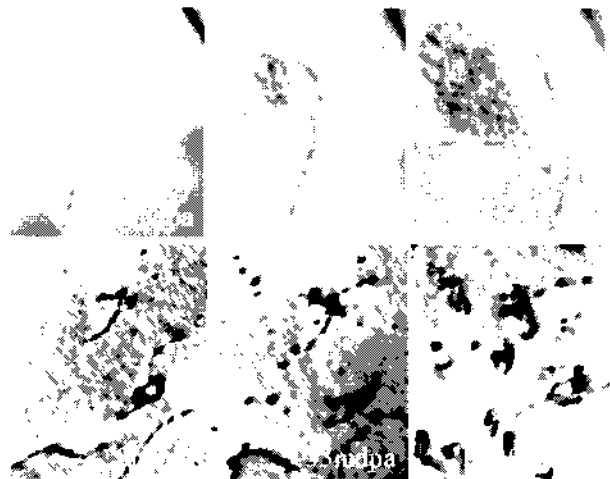


図 2 290℃で電子線照射した TEM 写真
(a) A533B 鋼 B 材, (b) Fe0.6Cu モデル合金

電界効果型 MOS 水素原子検出器の開発と実時間粒子リサイクリング計測への応用

大阪大学大学院工学研究科 福田 武司

1. 目的

核融合炉定常化の鍵を握るのは高い自発電流成分を持つ核燃焼プラズマにおける圧力と電流密度の分布形状ならびにプラズマ・壁相互作用の能動的制御である。後者は、九州大学応用力学研究所が先駆的な役割を果たして来た核融合研究の重点領域であり、独自に開発を行った超伝導強トロイダル磁場実験装置 (TRIAM-1M) でプラズマの長時間維持に係わる数々の独創的な研究を展開し、顕著な成果を挙げてきた。一方、中性粒子の寄与は近年特に注目されており、優れた閉じ込め性能 (高閉じ込めモード遷移) と高圧力化による高い経済性の実現 (高密度領域における輸送係数の増大) に関しても、プラズマ周辺部における粒子リサイクリングが重要な役割を担うことが知られているが、プラズマ・壁相互作用の物理化学機構は十分に理解されていない点が多く、ITER (国際熱核融合実験装置) の高性能長時間運転の成否も QUEST 装置等を用いた今後の当該分野における基盤研究の進展に依存していると言える。

従来より、レーザー誘起蛍光法などを用いた中性不純物粒子束の計測等に係わる基礎的な実験研究の結果が報告されているが、一般に中性水素原子の挙動を精度よく体系的に評価することは非常に困難である。また、DEGAS 等の中性粒子輸送コードにおいても第一壁におけるリサイクリング率は調節の可能な変数として取り扱われており、実験結果を適用した評価にはなっていない。本研究では、第一壁と燃料水素の相互作用に注目し、電界効果型 MOS 検出器を用いた水素原子検出器の開発を目的とした基礎研究を実施する。これを第一壁の各所に設置することによって、壁リサイクリング率の空間依存性 (トロイダル・ポロイダル方向分布) を測定し、平衡配位や温度・密度分布等のプラズマ物理量に加え、水素原子の H_{α} 線 (656.3nm) 強度分布や壁温度との相関を実時間で計測し、統合的な中性水素原子の挙動解明に資することを目的としている。さらに、将来的には輸送解析コードを発展的に組み合わせることにより、高性能定常核融合プラズマにおける粒子挙動の包括的理解に向けた際立った寄与が期待できる。

2. 電界効果型 MOS (MOSFET) リサイクリング検出器の原理

現在、市販されている代表的な水素検出器は高価である上に、分解能や応答時間の問題で核融合プラズマ実験には適用が困難である。一般に、水素の拡散による Pd (パラジウム) 薄膜の電気抵抗変化を測定するものが主流であるが、検知分解能が 10^3 ppm 程度 (1m^3 のプラズマ実験装置における $1\text{Pa}\text{m}^3$ のガス注入は標準気体の 20°C 体積濃度換算で 10ppm に相当)、応答時間も約 5 秒である。また、分解能が一桁高い表面波検出器 (圧電結晶基板上の楕円電極間を伝搬するパルス超音波の遅延を検出) は応答時間が (20-100) 秒以上である (東北大学山中)。Pd が水素の吸蔵によって膨張することを利用したバイメタルに類似した構造の片持梁型水素検出器が提案 (山形大学奥山) されているが、本研究では Pd 金属の表面に水素ガス (H_2) が吸着すると水素は原子 (H) に解離して Pd 中を拡散する性質を利用して、上図に示すような Pd をゲート電極とした MOSFET の応用を検討した。ゲート電極に吸着した水素分子が解離し、生成した原子 H が Pd 中を透過して SiO_2 (絶縁層) 界面に到達すると、水素原子が双極子モーメントを持つことから界面に双極子層が形成され、電極の誘電率が変化する。これによって実効的にゲート電圧が変化し、ドレイン (D) とソース (S) 間のチャンネル・コンダクタンスが変動することがその動作原理である。核融合実験装置では第一壁材料として炭素 (原子力機構の JT-60U 装置他) やタングステン (独 ASDEX-U 装置他) が用いられているが、本研究ではグラファイト壁を想定して Pd 上に (100-200) nm 程度の炭素薄膜を蒸着によって作製し、第一壁表面を模擬する。10ppm 以下の分解能が期待できるが、数 100ms 以下の時間応答 (第一壁のベーキング温度にも依存すると考えられる) が得られるかどうか为主要課題である。

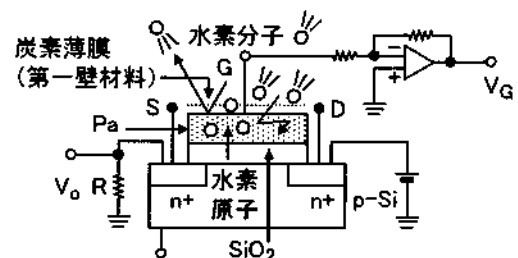


図. 電界効果型 MOS 第一壁水素リサイクル検出器の構造概念図

現在、市販されている代表的な水素検出器は高価である上に、分解能や応答時間の問題で核融合プラズマ実験には適用が困難である。一般に、水素の拡散による Pd (パラジウム) 薄膜の電気抵抗変化を測定するものが主流であるが、検知分解能が 10^3 ppm 程度 (1m^3 のプラズマ実験装置における $1\text{Pa}\text{m}^3$ のガス注入は標準気体の 20°C 体積濃度換算で 10ppm に相当)、応答時間も約 5 秒である。また、分解能が一桁高い表面波検出器 (圧電結晶基板上の楕円電極間を伝搬するパルス超音波の遅延を検出) は応答時間が (20-100) 秒以上である (東北大学山中)。Pd が水素の吸蔵によって膨張することを利用したバイメタルに類似した構造の片持梁型水素検出器が提案 (山形大学奥山) されているが、本研究では Pd 金属の表面に水素ガス (H_2) が吸着すると水素は原子 (H) に解離して Pd 中を拡散する性質を利用して、上図に示すような Pd をゲート電極とした MOSFET の応用を検討した。ゲート電極に吸着した水素分子が解離し、生成した原子 H が Pd 中を透過して SiO_2 (絶縁層) 界面に到達すると、水素原子が双極子モーメントを持つことから界面に双極子層が形成され、電極の誘電率が変化する。これによって実効的にゲート電圧が変化し、ドレイン (D) とソース (S) 間のチャンネル・コンダクタンスが変動することがその動作原理である。核融合実験装置では第一壁材料として炭素 (原子力機構の JT-60U 装置他) やタングステン (独 ASDEX-U 装置他) が用いられているが、本研究ではグラファイト壁を想定して Pd 上に (100-200) nm 程度の炭素薄膜を蒸着によって作製し、第一壁表面を模擬する。10ppm 以下の分解能が期待できるが、数 100ms 以下の時間応答 (第一壁のベーキング温度にも依存すると考えられる) が得られるかどうか为主要課題である。

イーレー・リディール型の (吸着粒子間に相互作用がない単純な) 表面反応を仮定すると、入射粒子 (B) を単位面積あたり N_S 個吸着可能な基板表面上に標的粒子 (A) が N_A 個存在する場合、吸着反応と脱離反応の速度は各々 $v_1 = k_1 p_A (N_S - N_A)$ 、 $v_2 = k_2 N_A$ となる。ここで、 $p_{A,B}$ は入射粒子と標的粒子の気相での分圧、 $k_{1,2}$ は吸着と脱

離の速度定数である。平衡状態では $k_1 p_A (N_S - N_A) = k_2 N_A$ となることから、吸着係数 $K_A = k_1/k_2$ を用いて吸着率 ($=1$ -リサイクリング率) $\theta_A = N_A/N_S$ は $K_A p_A (1 - \theta_A) = \theta_A$ より $\theta_A = K_A p_A / (1 + K_A p_A)$ と表される。基板表面における B 粒子との反応速度 $r_s = k_s p_B \theta_A$ (k_s : 反応速度定数) は以下のように書ける(ラングミュアの吸着等温式)。

$$r_s = k_s p_B \frac{K_A p_A}{1 + K_A p_A}$$

ここで、 $p_A \ll 1$ と考えると速度式は $r_s = k_s p_B K_A p_A$ となり、 p_A に比例する。逆に、 p_A が高い場合には $r_s = k_s p_B$ となり、吸着量が p_A によらず一定となる。反応速度の中性粒子圧力依存性を評価するだけでも重要なプラズマ・壁相互作用の実験研究に寄与する斬新で貴重な情報となるが、前者を想定した通常のプラズマ放電では、中性水素圧力に比例する形でゲート電圧が変動することになることから、異なるガス圧条件下における実験結果を組み合わせ吸着係数 K_A を評価することにより、リサイクリング率を「その場」で調べることができる(条件によって $k_s p_B$ に大きな変化がないと仮定)。また、全到達粒子数を評価する焦電素子(光にも応答することが問題になるが)やファラデー・カップを用いた粒子プローブの併用、Pd ゲート電極や蒸着炭素薄膜の厚みが異なる素子を組にしたアレイ配置検出器を用いた実験等、発展的展開を見込んでいる。

2. MOSFET リサイクリング検出器の開発

平成 18 年度はシリコン基板と Pd 薄膜を準備し、成膜設計を行った。成膜に関しては、ULVAC 社製 EBX-2000S 電子ビーム・プラズマ蒸着装置(右写真)を用いて $<10^{-2}$ Pa の圧力下で、Pd 箔を電子ビームで加熱することで熔融・蒸発させ、加熱した基板上(スパッタ蒸着で形成した SiO_2 絶縁層の上)に堆積させる。電子ビーム印加で熔融・蒸発した原子に 13.56MHz の RF を印加して電離し、基板ホルダ間に印加したバイアス電圧で加速された高エネルギー Pd イオンを基板に衝突させて成膜する。単純な電子ビーム蒸着法に比べて高エネルギーイオンの表面拡散が起こるため、緻密で均質な薄膜を形成することが出来る。一方、高周波放電によってプラズマを生成し、プラズマ中の陽イオンを負電極のスパッタ材方向に加速して衝突させ、その衝撃によってターゲット物質を基板上に堆積させるのがスパッタ法である。一般に、放電ガスにはアルゴンガスを用いる。電子ビーム・プラズマ蒸着法と同様に、硬く緻密な膜が作製可能であり、多元で複雑な組成の標的材料を用いても同一組成の薄膜をほぼ均質に作製できるが、高エネルギーのアルゴンイオンの衝突による薄膜の損傷が懸念される。これらの成膜法が検知器の性能に与える影響を比較検討する必要があるが、実際にはゲート電極の幾何形状が検知応答時間や感度により顕著に影響することから(S と d を電極の面積と厚みとして $C = \epsilon S/d$)、1mm $\square$ と 5mm $\square$ に対して各々 1mm、5mm の厚みを持つ計 4 種類の素子を作製(基板温度 350 $^{\circ}\text{C}$)するため、マスクの製作を行った。

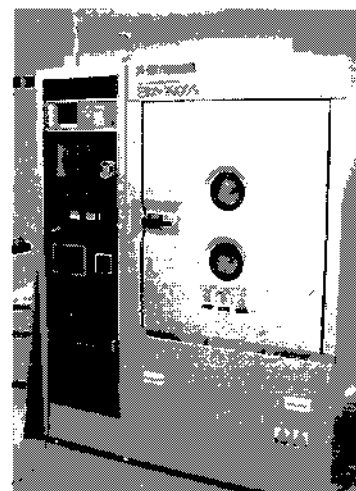


写真: 電子ビーム蒸着装置(右側: 成膜室・下部電子銃・左側 RF 電源)

来る水素化時代を鑑みても、本研究は核融合研究を足場とした産業応用技術に発展する可能性がある。平成 19 年度には、試作した検知素子の特性を幅広いガス圧領域で詳細に調べる予定である。また、上述のゲート電極作製法に加え、検知器の動作温度(ペーキング温度)に関してもそれらの寄与を定量的に検証する。動作温度が高いほど吸着水素の拡散運動が活発になることから、応答時間が短縮できると考えられる。必要な基盤データを取得した後は、複数の素子表面に厚みの異なる第一壁材料を成膜したアレイ状デバイス(ワン・チップ化も可能)を製作することにより、到達水素原子数や浸透・リテンションの度合いを高速で「その場」評価するシステムの構築を目指した検討を進め、QUEST 装置における適用性を評価する。また、信号処理に関しては、前置増幅器を経たアナログ電気信号を $<1\text{kHz}$ 程度のデジタイザで I/O ボード付きの計算機に取り込むのみであることから、容易に拡張(多チャンネル化)出来る。九州大学での試験に際しては、既設の他計測装置との整合を図り、可能な限り既存の設備を有効利用する指針である。大阪大学で駆動電源回路等の周辺機器を含む試作リサイクリング検出器の原理実証と性能評価試験を平成 19 年度に行い、プラズマ実験で素子機能の有効性を確認した後(平成 20 年度以降)に、複数のユニットを製作して真空容器内のトロイダル・ポロイダル方向に異なる複数の位置に検出器を配置することにより、3 次元的な評価を可能にする。さらに、将来的には核融合科学研究所との連携により、粒子輸送コードを組み合わせた解析を発展的に実施して、包括的な粒子輸送評価手法の確立を目指す。

固体水素ペレットのドリフトチューブ中での挙動解析

九州大学総合理工学研究院 横峯健彦

1. 目的

核融合炉内プラズマへの燃料供給技術に関して現在様々な方式が提案されているが、そのひとつにドリフトチューブによる固体ペレット入射法がある。これは燃料である水素を円柱状の固体ペレットにし、これを加速し、高真空状態にした細長い湾曲したチューブを経由しプラズマ周辺に入射する方法である。湾曲したドリフトチューブと私用することにより、空間が非常に制限されている核融合炉の装置設計に自由度を増すことができる。直管を用いた固体ペレット入射に関するこれまでの実験的研究から、ガイドチューブ内を通過し射出された燃料は、チューブの形状によらず入射時に比べて数%との質量減少が生ずることが確認されている。その原因としてチューブ内壁との摩擦、ふく射あるいは固体ペレットの破砕などが指摘されているが、何が決定的となるかは明らかにされていない。また、ドリフトチューブ内を固体ペレットが通過するときの速度は数百 m/s から約 1000m/s と想定されており、この場合解析対象は、総変化(主に昇華)あるいは衝撃による大変形を伴う可能性のある高速の物体の挙動となるが、このような現象解析に用いることのできる計算手法は確立されていない。本研究では、ペレットが壁に衝突一離脱する際に生ずる質量変化に関与する現象をモデル化し、数値予測モデルを開発する。

2. 計算手法

粒子の運動追跡に、MPM(Material-Point Method) [1][2]を用いる。MPM は物体内部の変形を伴った衝突、接触問題を解析対象として開発された手法で、解析対象の物体を粒子点の集まりと考えるために物体の界面を明確に捉えることができる。MPM は物体の運動解析については本研究の目的に適した手法であるが、温度場解析に適用することはできないため、本解析では SPH[3]手法を MPM に応用した。

ペレットが壁に衝突する際の摩擦および熱伝導については以下のように取り扱う。摩擦については固体間において経験的に知られているクーロン・アモントンの法則を用いて格子点に働く摩擦力として考慮し、摩擦力のした仕事が全て熱に変換されると仮定する。ペレットと壁との接触面積をヘルツの接触理論より算出し、その界面を通じて壁からペレットへ伝達される熱量を解析解より求める。さらに、塑性変形を伴う衝突の際に生ずる接触熱伝達に関するモデル [4] を導入した。壁面からのふく射伝熱に関しては実際のチューブとペレットの形状から、二面間のふく射伝熱量を考慮する。

相変化に関しては粒子点温度が昇華点を超えた場合に対応するエネルギー差から相変化量を求め、その変化分を対象となる MPM の粒子点質量を減ずることで評価する。

本解析では簡単のため相変化後の水素については考慮していない。相変化に関しては粒子点温度が昇華点を超えた場合に対応するエネルギー差から相変化量を求め、その変化分を対象となる MPM の粒子点質量を減少させると同時に、気体を発生させる。相変化に伴う一連の過程、すなわち昇華一圧力伝播のプロセスは CIP 法により解析する。

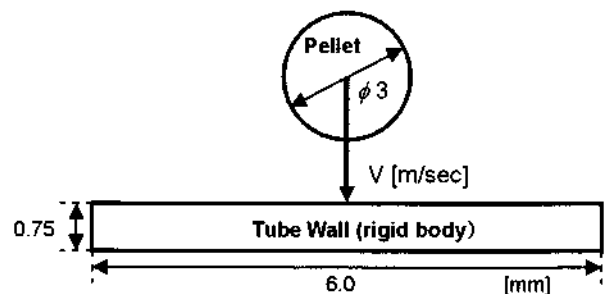


Fig.1 Calculation System

3. 問題設定

固体水素ペレットは円筒形(半径 1.5mm、長さ 3mm)とし、図 1 のように 2 次元問題として取り扱う。ペレットおよびチューブ内壁の初期温度はそれぞれ 4.2K、301K である。ペレットの速度は 1000m/s とし、入射角 $0.5 \sim 4^\circ$ に対応して垂直方向の速度 V を 9m/s $\sim$ 70m/s に変化させて計算した。

4. 結果及び考察

図 2 に摩擦係数の違いによるペレット質量変化を示す。摩擦係数を 0.1 $\sim$ 0.9 まで変化させた結果、摩擦係数の変化による差は小さく質量減少には摩擦係数は影響しない。これは 1 回の接触時間が数 10 μ sec と短いことによる。図 3 に衝突速度 9m/s (衝突角度 0.5°) と 70m/s (衝突角度 4°) の場合における質量変化を示す。両速度に対し、それぞれ昇華後の気体(水素)の有無による違いを載せている。昇華後気体の存在を考慮しない場合、70m/s の質量減少率は 9m/s のそれのおよそ 4 倍であるのに対し、気体の存在を考慮すると両者に比は 2 倍に減少する。気体の存在の影響を考察するため、図 4 に衝突速度 70m/s

の場合の昇華後のペレット水素の圧力変化を示す。横軸の0は接触中心を示す。昇華直後約1 μ secは接触領域で高い圧力状態を維持する。図5には、最初に衝突してからのペレット重心速度の時間変化を示す。低入射角（低衝突速度）の場合、衝突後溶融したペレット水素が昇華し、昇華ガスからの圧力により重心速度は0近くまで減速し、跳ね返ることができない。その時点で依然昇華ガスが存在するそのため、ペレットはガスの上にいるようになり、計算では気体を介して壁—気体、気体—ペレットの伝熱を考えていないため質量減少はふく射伝熱のみとなる。一方、高入射角（高衝突速度）の場合は、低入射角同様重心速度が減少するが、昇華ガスの圧力に逆らって壁面に衝突し、跳ね返ることができる。計算ではその後3回衝突—離脱を繰り返し、最終的に重心速度が0まで減速する。すなわち、低入射角の場合は昇華ガスによるクッション作用が最初の衝突時から効果的に働くのに対し、高入射角の場合は昇華ガスのクッション作用が衝突—離脱を繰り返した後に効くようになる。この差が昇華ガスの存在による両入射角での質量減少率の違いを顕著にするものと考えられる。この計算では、昇華ガスが衝突に対してのみ作用すると仮定しているが、実際は衝突姿勢によって昇華ガスが飛行姿勢に影響し飛行不安定を生じさせる可能性がある。このことによる質量減少への影響も大きくなることが予想される。

5. 参考文献

- [1] Deborah Sulsky, Z. Chen, Howard L. Schreyer, A particle method for history-dependent materials, Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. 118 (1994) 179-196.
- [2] Deborah Sulsky, Shi-Jian Zhou, Howard L. Schreyer, Application of a particle-in-cell method to solid mechanics, Computer Physics Communications, 87 (1995) 236-252.
- [3] J. J. Monaghan, SMOOTHED PARTICLE HYDRODYNAMICS, Annu. Rev. Astron. Astrophys. 30 (1992) 543-574.
- [4] F. Ben Ammer et al., Proc. ASME/JSME Thermal Engineering Conference, 4 (1991) 461-492.

6. 研究組織

研究代表者 横峯健彦（九州大学総合理工学研究院）

研究協力者 佐藤浩之助（九州大学応用力学研究所）、山下雄一郎（九州大学総合理工学府）

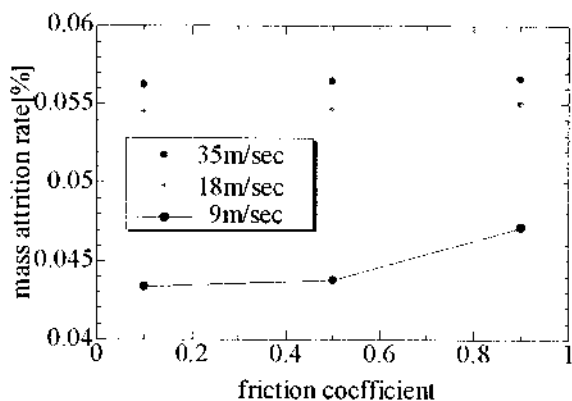


Fig.2 Effect of friction factor on mass attrition rate

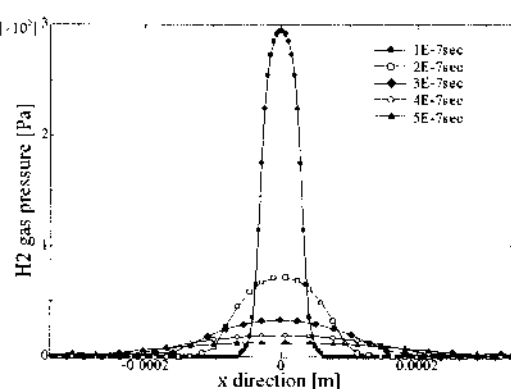


Fig.4 Sublimation pressure profile

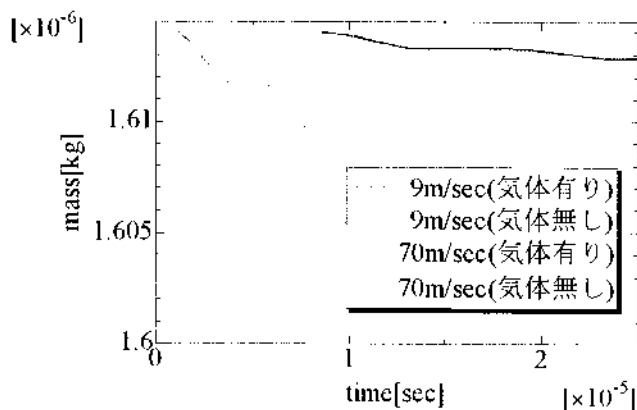


Fig.3 Mass change evolution

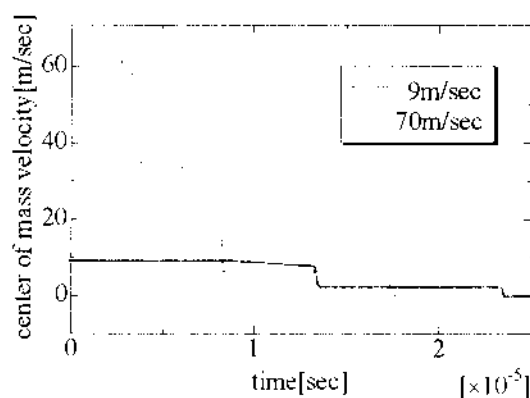


Fig.5 Change of center of mass velocity

プラズマ対向材料の損耗・損傷評価

核融合科学研究所 大型ヘリカル研究部 芦川 直子

目 的

第一壁の損耗および再堆積に関する問題は、損耗による材料損傷と堆積層による壁リテンションを通じたりサイクリングへの影響などの各々の課題として捉えることでは十分な理解が得られない。特に、将来のトリチウム・インベントリや核燃焼への影響など重要な課題のアセスメントを展望するには二つの競合過程の関連を、矛盾のなく合理的に説明することが必要である。

LHDは第一壁材にステンレス、ダイバータ板に炭素を用いているが、これまでの研究により炭素の損耗は主に主放電中に生じ、ステンレスの損耗はグロー放電中に生じることが明らかとなっている。また、真空容器内に設置された材料プローブによるポロイダル分布に関する分析では、プラズマとの距離の観点からプラズマ中で発生した荷電交換粒子による影響が高いと想定される位置で損耗率が高く、プラズマから離れた位置で再堆積の影響が高く炭素の組成比が高い。

本研究では各種ガスを用いたグロー放電によるステンレスへの損耗率が実験的に同定されていることから、それらの値を元にグロー放電中における第一壁損耗率を評価する。またダスト捕集量、材料プローブによる組成比を含む堆積層分布から、真空容器内で損耗された壁材の輸送に関する評価を行なった。

実験方法

LHDでは各種ガスを用いてグロー放電が実施されているため、個々における損耗率を同定した。既にNeグローにおける損耗率をAFM分析によって実験的に求められており、これを元にスパッタ率のガス依存性から水素、ヘリウムにおけるステンレス(SS)への損耗率を求めた。また、運転時間からグロー放電中における第一壁損耗率の評価を行った。またダスト捕集実験、および真空容器内長期設置サンプルへのAESによる分析結果より、組成比を含む堆積層の深さ分布を得、堆積物の評価を行った。

結果および考察

過去3年間の第7, 8, 9各実験サイクル終了後の大気開放直後に実施されたメンブレンフィルタを用いたダスト捕集では、電子天秤で測定した単位面積当たりの平均捕集量は2.2-7.8 mg/m²である。また、捕集量のポロイダル依存性は小さく、粒子径1 μm以下が主に球形状の炭素、1 μm以上がステンレスに起因する鉄で異形状あることが明らかとなっている。全捕集量に対する体積比は求められており、SSは9割を占める。そのため、例えばLHD真空容器内・横長断面の第一壁(下部)では3.6 - 4.5 mg/m²となった。また、堆積層に関してはAESにより深さ方向の原子組成比が求められており、その結果に対して鉄の比重を用いることで値を得た。先の横長断面下部での出すと採取位置の近い場所でのSS堆積層は22.5 mg/m²でダスト採取よりも多いことが分かる。試料上の堆積物では堆積層とさらにその上のダストとは切り離しを行っておらず、したがって双方の増合算が堆積物として検出されていることになる。よって、このダストと堆積物の存在比は妥当であ

る。ただしグローによる損耗量と比較すると、まだ差が大きい。その理由として新たな堆積場所がある、堆積密度の誤差が大きい、の2つが考えられるが、現在のところ前者を考えている。

まとめ

金属第一壁装置であることを考慮し、ステンレスの損耗とダストを含む再堆積物の量について算出を行った。グロー放電洗浄の運転時間から見積もられたステンレス第一壁の損耗量は g/m^2 オーダーであり、採取されたステンレスに起因する鉄・ダストおよび鉄不純物の堆積層は $1\text{--}10\text{ mg/m}^2$ オーダーである。鉄不純物の堆積物はダストより堆積層中に存在する方が多く、ダスト+堆積層=堆積物という観点から妥当な値であった。また、損耗と堆積物量の差が大きいため、分析された第一壁以外の領域に堆積していると考えられる。現在分析を行っていない箇所であるダイバータ上への堆積を考えた場合、過去に2000年度の実験では水素およびヘリウムによるグロー放電洗浄でダイバータ上へ 0.19 g/m^2 の鉄が堆積しており、この値は今回の鉄堆積物の表面密度よりも多い。現在は、よりスパッタ率の高いNeおよびArグローを併用しているため、少なくとも2000年度の値よりも多いことが想定される。そのため今後これらの分析をさらに進める必要がある。

研究成果報告

芦川直子他「LHDにおける第一壁損耗と発生ダストの関連に関する研究」第23回プラズマ核融合学会年会、招待講演

研究組織

代表者	芦川直子	核融合科学研究所	助手
協力者	小森彰夫	核融合科学研究所	教授
	森崎友宏	核融合科学研究所	助教授
	増崎 貴	核融合科学研究所	助教授
	坂本隆一	核融合科学研究所	助手
	吉田直亮	九州大学応用力学研究所	(所内世話人)
	徳永和俊	九州大学応用力学研究所	
	材料グループ	九州大学応用力学研究所	

TRIUM-1M での非対称プローブによるイオン温度データの解析と CPD および QUEST での PWI 研究

日本原子力研究開発機構 上原和也（主任研究員）、中央大学 雨宮宏（講師）、上越教育大学 定本嘉郎（助教授）

九大応用力学研究所 坂本瑞樹（助教授）、木村成明（修士課程 2 年）

概要

応用力学研究所の準定常トカマク TRIUM-1M で、プラズマ輸送やプラズマ壁相互作用 (Plasma Wall Interaction, PWI) を考える上で周辺のプラズマのイオン温度は重要なプラズマパラメーターである。我々は TRIUM-1M プラズマに対して改造型の非対称型ダブルプローブを用いてイオン温度を測定してきた。今年度は、TRIUM-1M の特徴的なプラズマである高効率電流駆動プラズマ (Enhanced Current Drive, ECD) 及び高イオン温度プラズマ (Hot Ion Temperature,

HIT) に対し、非対称型ダブルプローブで測定したイオン温度のデータ解析を行った¹⁾。CPD および QUEST での PWI 研究については出来なかったもので、ECD と HIT の物理的描像についての考察をまとめた。

非対称プローブによるイオン温度の測定方法と測定ポイント

非対称プローブは、電極長さの違うダブルプローブで、プローブ列を磁力線方向に置きプローブ特性を測定する。 I_1 、 I_2 を長、短電極でのイオン飽和電流値とすると、この比の値 (I_1/I_2) からイオン温度 T_i を測定することができる。通常のダブルプローブでは $I_1=I_2$ となつてイオン温度は測定不能である。

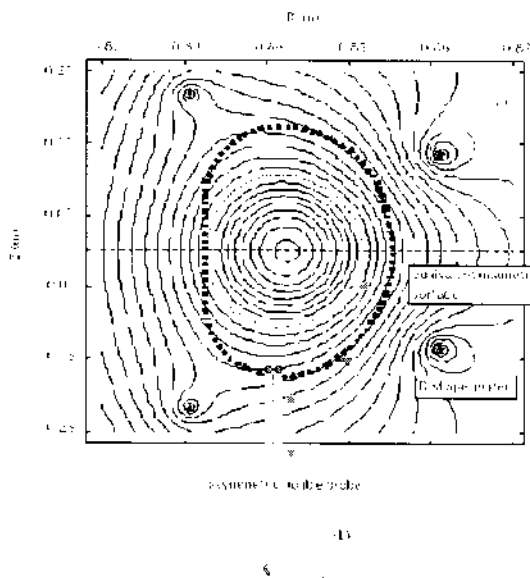


図1 TRIUM-1Mにおける非対称プローブ測定ポイント。(a) TRIUM-1Mのトロイダル断面、等磁気面とリミター位置およびプローブ挿入方向。(b) TRIUM-1Mに取り付けられた非対称ダブルプローブの写真。

TRIUM-1M にとりつけた非対称プローブは強磁場(トロイダル磁場 $B_t=6\sim7$ T)用に特別に設計したもので、大きさは低磁場用のものよりも小さい。長電極の長さは 9 mm、短電極の長さは 4.5 mm であり、両電極とも半径は 0.75 mm である。プローブ電極の材質はタングステンである。

図1は TRIAM-1M のポロイダル断面と非対称プローブによる測定ポイントを示している。実

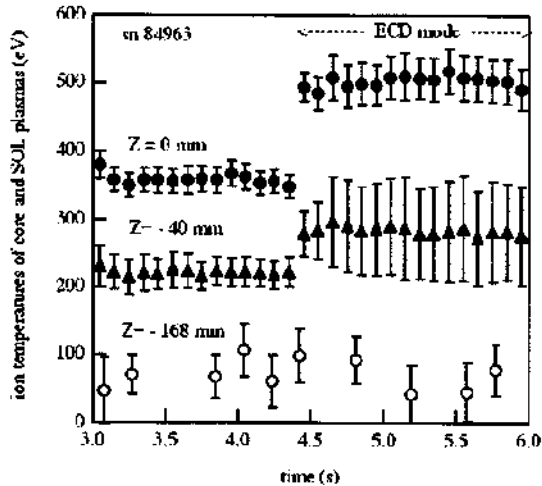


図2 ECDモードに於けるイオン温度の時間変化。放電条件はトロイダル磁場 $B_t = 7\text{ T}$ 、コアの密度は $1 \times 10^{19}\text{ m}^{-3}$ 。Z = 0 mm及びZ = -40 mmの測定はNEAによる。Z = -168 mmでの値が非対称プローブによる測定である。

高いイオン温度プラズマ(Hot Ion Temperature mode, HIT) に関して周辺領域のプラズマ密度 n_e 、イオン温度 T_i 、それに電子温度 T_e を測定し、解析を行った。

(1) ECD に於ける周辺イオン温度

図2は $B_t = 7\text{ T}$ の LHCD($f=8.2\text{ GHz}$, $P_{\text{RF}}=50\text{ kW}$) に於ける ECD モードのプラズマに対して、非対称プローブで測定した、周辺プラズマでの T_i の時間変化である。NEA(Neutral Energy Analyser)で測定されたコアプラズマの T_i も示した。このデータでは、ECD モードに入るとコアの中心領域(Z=0 mm)での T_i は 350 eV から 500 eV と大きく上昇しているが、周辺(Z=40 mm)に行くに従ってこの上昇度は 220 eV から 280 eV へと小さくなっているのがわかる。そして SOL 領域(Z=-168 mm)では、非対称プローブでの測定は T_i は 50 eV から 100 eV の値で殆ど時間変化はない。 詳細なデータの妥当性をチェックする為に、同様の周辺プラズマでの測定である異常ゼーマン効果による分光測定との同時測定を試みているが、詳細なデータ解析はまだである。

(2) HIT に於ける周辺イオン温度

図3は $B_t = 6\text{ T}$ の LHCD($f=2.45\text{ GHz}$, $P_{\text{RF}}=8\text{ kW}$) に於ける HIT モードのプラズマに対して、非対称プローブで測定した、周辺プラズマの T_i の時間変化である。NEA で測定されたコアプラズマのイオン温度も同時に示した。HIT モードは $t = 8.5\text{ sec}$, 16 sec 及び 28 sec 付近で起こ

際のプローブチップの写真も掲げた。プローブ電極は破損を避けるためにサポート(ステンレス製)に取り付くまでT字型のものを一体もので製作している。プローブはトラス下側から垂直上方向に設置され、他のダブルプローブ列(Langmuir probe 類)の一角を占め、上下方向に駆動出来る。

実験結果

TRIAM-1M では、低域混成(LH)波による電流駆動(LHCD)で長時間定常的なプラズマを得ている。そのなかでも、TRIAM-1M の先進的なモードである、高効率電流駆動プラズマ (Enhanced Current Drive mode, ECD) と

っている。このデータでは、HIT に入ると中心領域($Z=0$ mm)での T_i は大きく瞬時的に上昇し

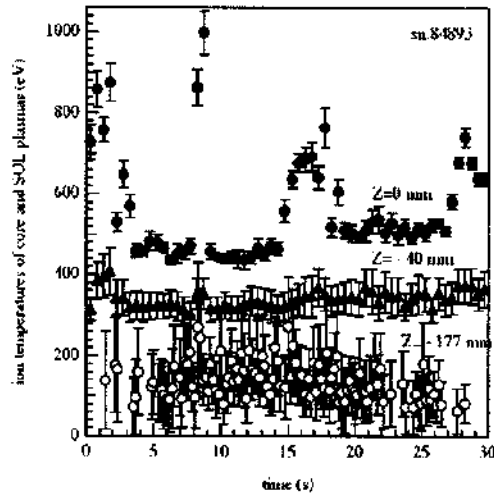


図3 HITモードに於けるイオン温度の時間変化。放電条件はトロイダル磁場 $B_t = 6$ T, コアの密度は $4 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$, LHCD パワー P_{rf} (周波数 $f = 2.45$ GHz) は 8 kW, $Z = 0$ mm 及び $Z = -40$ mm の測定はNEAによる, $Z = -177$ mm での値が非対称プローブによる測定である。

されているが、そのメカニズムについては以下のようなことが考えられる。電流駆動では高周波がランダウ減衰で共鳴粒子がトロイダル方向に電場 $E_{\parallel}$ を直流的に感じて、電子が加速され衝突とのバランスで電流が流れる。この電流はポロイダル磁場 B_{θ} をつくるとともに、電場 $E_{\parallel}$ との $E_{\parallel} \times B_{\theta}$ ドリフトにより共鳴電子がトーラス内側にフラックスを形成する。つまり、LHCD では電流が流れてポロイダル磁場を作るだけではなく、加速された電子は内側に向かいフラックスが生じて閉じ込めが改善されるのである。ECD でのプラズマ温度の上昇は通常の拡散係数が内側へのフラックスで減少し、少しのパワー入力でも加熱が得られているのかもしれない²⁾。

LH 波による通常の加熱実験では、電流駆動モード(モード変換が起こらない)ではなく電場は磁場に対して垂直方向に向くイオンパーシュタイン波のサイクロトロン減衰を使うので、HIT で観測されているような電流駆動モードでのこのようなイオン加熱は起こらないはずである。

参考文献

- 1) Y. Sadamoto et al., submitted to Nucl. Fusion
- 2) K. Uehara, J. Phys. Soc. Jpn. 57, (1988) 4169

研究成果報告

上原和也「TRIAM-IM での非対称プローブによる周辺イオン温度データの解析とランダウ減衰による電流駆動の直接描像」第22回トリアム研究会、平成18年12月

ているが、周辺領域($Z=-40$ mm)に行くに従ってこの上昇度は非常に小さくなっているのがわかる。そして SOL 領域($Z=-177$ mm)では非対称プローブでの測定では T_i は 50 eV から 200 eV の値で、殆ど周辺イオン温度に時間変化はない。この時 SOL 領域での電子温度は一定(~ 15 eV)であるが、密度は $t = 8.5$ sec の HIT モードの時のみ、ゆるやかに上昇している。

電流駆動時の閉じ込め改善モード(ECD および HIT)の考察

TRIAM の ECD と HIT では電流駆動プラズマで閉じ込めが改善され、温度が上昇していることが示唆される。LHCD でプラズマの閉じ込めが改善されることは、他のトカマクでも観測

TRIAM-1M 周辺プラズマ中揺動の統計的解析

研究代表者 名古屋大学エコトピア科学研究所 大野哲靖

1. はじめに

小さなプラズマの塊 (Blob) が磁力線を横切って輸送される非拡散的輸送現象が、核融合の周辺プラズマにおいて重要な研究課題になっている。トカマク周辺プラズマでは、Blob 伝搬を示唆するパースト的な密度揺動が観測されている。しかし、Blob の発生機構および伝搬過程は明確ではなく、詳細な観測および解析が必要とされている。

本共同研究では、プローブアレイによって得られた高時間分解のイオン飽和電流時系列データの解析を行い、TRIAM-1M の周辺領域での揺動の統計的な性質 (歪度、尖度) の空間依存性、密度パーストの速度分布関数の導出、さらにそれらの結果をもとに Blob の伝搬が磁力線を横切る輸送への寄与を明らかにすることを目的としている。

2. 実験および計測について

周辺プラズマの揺動データとしては、TRIAM トカマクの下側ラングミュアプローブアレイで計測されたイオン飽和電流計測データを用いた。下側プローブはリミター内表面に相当する径方向位置に設置されている。プローブへのバイアス電圧は 100V であり、検出抵抗は 100 Ω である。また信号のサンプリング時間は、1 μ s である。2 台 8.2 GHz の LHCD で維持されている放電を解析の対象とした (# 08294)。これまでの解析においては、大半径方向位置 R=860 mm に位置する 10 番プローブのデータを対象に解析を行ってきたが、今回は大半径方向位置 R=820 mm に位置する 6 番プローブのデータの解析を行い、これまでの結果との比較を行い、位置による密度揺動の統計性に变化について調べた。

3. 解析結果

図 1 は、解析に用いたラングミュアプローブアレイによって計測されたイオン飽和電流の時間発展 $X(t)$ を示している。R=860 mm のプローブデータに比べて、R=820 mm では、多数の正のスパイクが観測される。ある振幅の信号が現れる頻度分布 (確率密度関数: PDF) より、歪度 (Skewness) および尖度 (Kritosis =

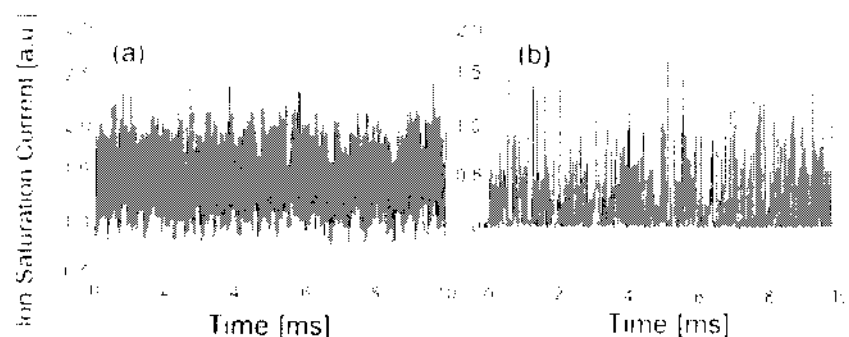


図1 イオン飽和電流の時間発展 (a)10番プローブ(大半径位置 R=860mm), (b)6番プローブ(大半径位置 R=820mm)

Flatness - 3)を求めた。歪度および尖度は、PDFの3次および4次のモーメントであり、それぞれPDFの非対称性と広がりを表す指標である。現象が乱雑であり、PDFがガウス分布となる場合は、歪度は0、尖度は0の値をとる。図1(a)では歪度が0.3、尖度が-0.2とガウス分布に比較的近い値を示したのに対し、図1(b)では歪度が1.4、尖度が1.7と大きな値が得られ、正のバースト的な信号が顕著であることを示している。

図2は、揺動のパワースペクトルを示している。図2(a)、(b)ともコヒーレントな揺動成分は見られない。図2(b)で観測されるような境界領域での間歇的な現象を説明するモデルとして、SOC (Self Organized Criticality) モデルが提唱され、いくつかの核融合装置の周辺プラズマ揺動の解析に用

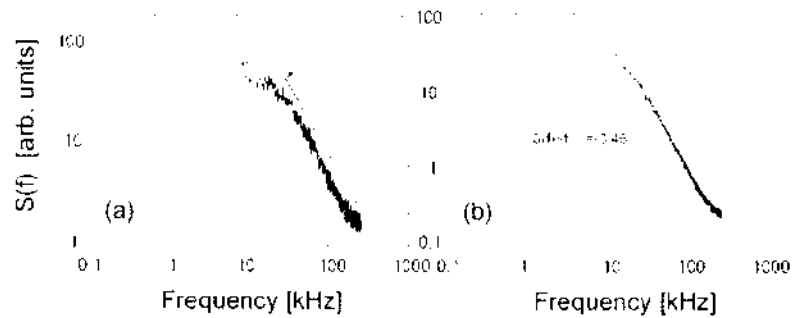


図2 揺動のパワースペクトラム (a) 10番プローブ (大半径位置 $R=860\text{mm}$)、(b) 6番プローブ (大半径位置 $R=820\text{mm}$)

いられている。SOCモデルでは $S(f) \propto f^{-1}$ が予測されているが、図2(b)では $S(f) \propto f^{-3.48}$ となり、SOCモデルによる予測とは異なる結果となった。他のモデルによる検証が必要である。

揺動の時系列データ $X(t)$ に対して時間遅れ l を導入して、 $\delta_l X(t) = X(t+l) - X(t)$ のPDFを用いて解析を行った。例えば系が完全にポアソン過程に従うとすれば、 l によらず $\delta_l X(t)$ のPDFは常にガウス分布となる。昨年度の解析においては、図1(a)の $\delta_l X(t)$ のPDFは、 l によらずほぼガウス分布に近いことが示された。図1(b)に対しても同様の解析をおこなった。図3の左図は、 $\delta_l X(t)$ のPDFの l 依存性を示したものである。図の上から $l=1, 2, 10, 20, 50, 100, 200, 500\mu\text{s}$ に対応している。時間スケールが $20\mu\text{sec}$ までは歪度の値は変化していることが分かる。この時間スケールは、一種の粗視化時間（もしくは現象の記憶時間）と考えることができる。

このように異なる粗視化時間に対して確率密度関数の特性が異なる場合、通常のフラクタル解析では粗視化時間ごとにフラクタル解析を行う必要がある。今回マルチフラクタル解析を行ったところ、マルチフラクタル指数 λ^2 が図1(a)の場合 0.008 (前年度報告) に対して、0.026 と大きな値を示し、強いマルチフラクタル性を有していることが明らかになった。

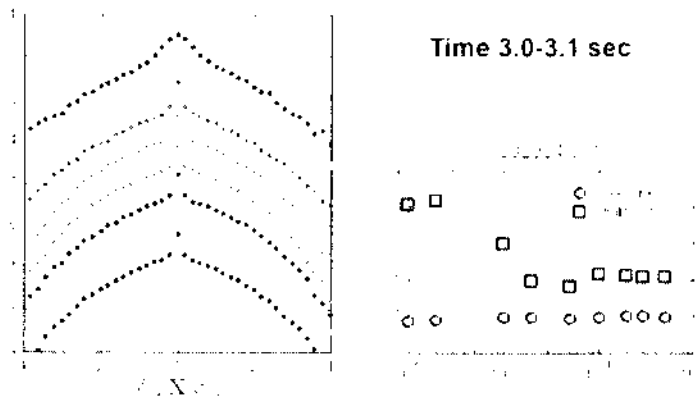


図3 時間遅れ確率密度関数と歪度、尖度の時間遅れ依存性

ニューラルネットワークの TRIAM-1M プラズマ計測への応用

電気通信大学電気通信学部情報工学科 竹田辰興

目的

TRIAM-1M プラズマを念頭に、その物理量を計測データから実時間で解析し、計測量の時系列データから物理量の予測を行い、計測データから物理量の挙動を支配する方程式の未知パラメータを評価すること等へのニューラルネットワークの適用方法について研究開発する。特に、TRIAM-1M が長時間放電実験装置であることを考慮して、計測データ解析が実時間で行われることを重視する。

研究概要

ニューラルネットワークは、入力データの重み付き和とある非線形変換からなる比較的簡単な計算ユニットを結合してネットワークを構成し複雑な計算ができるようにしたシステムである。その構造、データの取り扱い方、応用対象によっていろいろな観点からその働きを分類することができる。今年度の協力研究では、計測データ解析によく用いられる多層ニューラルネットワークについて詳しく調べ数値実験を行い、プラズマ計測データの解析への応用可能性について検討した。

◇ニューラルネットワーク選点法 (NNCM: Neural Network Collocation Method)

通常、多層ニューラルネットワークにおける学習は、出力データと教師データの差の二乗和を目的関数とし、この目的関数が最小値をとるようにネットワークの内部パラメータ（ウェイト）を調整することによって行う。多層ニューラルネットワークの出力は入力変数の連続微分可能な関数であるので、目的関数として微分方程式の残差の二乗和を採用することが可能で種々の最適化アルゴリズムによってこの目的関数を最小化できる。目的関数に使う方程式としては微分方程式のみならず、積分方程式や一般の代数方程式およびそれらの組み合わせを考えることができる。この際、一般的には、解析対象とするシステムにおける独立変数を離散化して選点集合を作り各選点において残差の二乗等からつぎのような目的関数を構成する（従来、この方法を「残差最小化学習法」と呼んできたが、今回、より適切で一般的な「ニューラルネットワーク選点法 (NNCM)」と呼ぶことにする）。

$$E = \sum_{\text{observation points}} (\bar{y}^{NN} - \bar{y}^{obs})^2 + \gamma \sum_{\text{collocation points}} (L\bar{y}^{NN})^2$$

NNCMにおいては、複数のニューラルネットワークを組み合わせでいろいろな残差の二乗和からなる目的関数を最小化することで学習を行うことができるので測定データをもとにした逆問題解析に有効に利用できる。本研究の目的は、このNNCMを使ってTRIAM-1Mプラズマの計測データ

を解析し、予測及びパラメータ推定を行なうことであるが、本年度はTRIAM-1Mの実データの解析までは行わず、本方法の基本的性質についての数値実験を行ないプラズマ解析への適用可能性を検討した。この方法は、学習のための目的関数によって、色々なタイプの問題に適用できるが、今回はその対象として（１）CT型問題、（２）時系列予測型問題、について検討した。

◇CT型問題

CT（コンピュータトモグラフィ）型問題に関しては、既に、ニューラルネットワークによる一般的な少数データトモグラフィ[1]およびプラズマ中の電子密度分布再構成のためのニューラルネットワークを用いた非対称アーベル逆変換[2]に関して成果を挙げている。これらはいずれも投影データの数が少ないことを特徴としており、特に、後者は投影経路の方向が1方向に限られている問題である。投影経路の方向が1方向の場合、何らかの制約条件を課さない限りその方向の分布を再構成することはできない。この問題を克服するために、等密度面はMHD平衡の磁気面に一致するとして、対象とする磁気面を1パラメータで表現したMHD平衡シリーズの中から自動的に選ぶようなアルゴリズムを採用して解析に成功した。これほど極端ではないがGPS衛星からの電波の位相遅延測定から電離圏プラズマ電子の密度分布を再構成する3次元CT像再構成問題[3]では水平方向の測定経路がほとんどないという困難がある。この解析で特に有効だったのは、GPSからの遅延データ以外に国内4ヶ所で得られるアイオノゾンデ測定データのの一つを使って3次元の解析領域中の一点（アイオノゾンデステーション上空で電子密度が最大になる位置）の座標値とそこでの電子密度を拘束条件として用いることであった。拘束条件として用いなかった残り3ヶ所のデータは検証用に使うことができるが、実際、再構成値の測定値からの誤差はきわめて少ないことが確認された（Fig. 1）。NNCM法が少数データトモグラフィに有効である根拠は、ニューラルネットワークによる関数近似が「可変基底関数(Variable basis functions)による関数展開」であることによるものと推定される。この点に注目して電離圏プラズマ密度分布再構成問題についてNNCM法を従来の「固定直交関数(Fixed orthogonal function series)展開法」と比較したものをTable 1に示す[4]。これらの成果に基づいてNNCM法を用いたCT像再構成法を有効に用いるためには以下の点を考慮すべきであることがわかった。(1) 投影経路の空間分布の偏りによる情報欠損を補うための何らかの拘束条件を加えること。これは、等高線の形状であっても良いし、他の方法により与えられた正しい値であってもよい。(2) オーバーフィッティングによる不安定性を避けるために解析領域をメッシュ分割し、再構成密度は区分定数値をとるようにする。(3) 出力値の範囲が予めわかっている時にはこの条件を利用して学習の安定性を増す工夫をする。プラズマ電子密度分布CTの場合には出力値は必ず正であるからニューラルネットワークの最終層の活性化関数として正值のみを出力するスキマー型関数を用いることで良好な結果を得た。

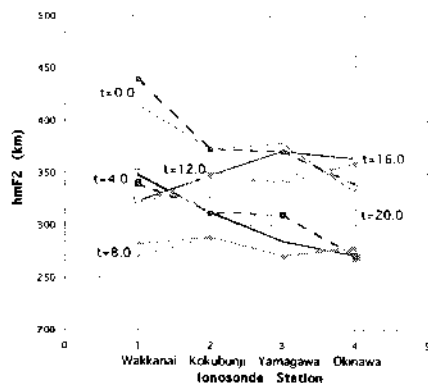


Fig.1 hmF2 at 4 ionosonde stations

Method	Basis Function	Problems
ORF	Fixed Orthogonal Function Series	Linearity, smoothness of signals
UBF	Variable Basis Function Series	Linearity, smoothness of signals
Ensemble	Ensemble	Linearity, smoothness of signals
NNCM	Variable Basis Function (NNCM)	Linearity, smoothness of signals

Table 1 CT methods, Basis functions, and Problems

Observed(Solid), Reconstructed(Dotted)

◇時系列予測型問題

時系列の自己回帰予測では等時間間隔で得られたデータ $(x_1, x_2, \dots)$ があるとき、連続する n 個のデータ $(x_{i+1}, x_{i+2}, \dots, x_{i+n})$ の線形結合を使って x_{i+n+1} の値を予測する。通常のニューラルネットワーク予測では、線形結合の部分が多層ニューラルネットワークで置き換え、予測値を出力するニューラルネットワークを $F_{NN}(\cdot)$ として、次式を用いる。

$$\hat{x}_{i+n+1} = F_{NN}(x_{i+1}, \dots, x_{i+n})$$

このように非線形時系列予測では、時系列データが次のような連立1階常微分方程式の解であるとしてNNCMによってこの右辺を決定し数値積分によって未来の値を予測することも可能である。

$$\frac{d\vec{x}}{dt} = \vec{g}(\vec{x})$$

今まで、気象学におけるエルニーニョ南方振動の予測、生態系解析などに際しての遅延微分方程式によって発生した時系列の予測などにNNCM法を適用して満足すべき結果を得た。ディスプレイ予測のように核融合プラズマ研究において重要な課題にも適用可能と考えている。今年度は、時系列が次式のような遅延微分方程式の解である場合についてのNNCM法の適用可能性について数値実験を行ないつつ検討を加えた[5]。

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= G(x(t), x(t-\tau)), \quad 0 \leq t \\ x(t) &= h_0(t), \quad -\tau \leq t \leq 0 \end{aligned}$$

ここで、 $x(t)$ は時刻 t におけるシステムの状態で、 τ は未知の遅延時間、 $h_0(t)$ は任意の初期関数である。時系列が遅延微分方程式の解であるような現象についての研究はまだ十分進んでいるとは言えない。核融合プラズマ研究においては制御過程に関連して重要になるものと考えられる。

NNCM法を遅延微分方程式に当たってのNNCM系のシステム構成はFig. 2に示す通りである。これまで行なってきたNNCM法の解析と比べて特に注意すべき点は、まず、学習のための最適化に際

して遅延時間 τ と他のパラメータの振る舞いが大幅に異なるために、同時に最適化を行なうことが困難な点である。我々は「強制ランダム探索付き二重ループ最小化法」という概念を提案して良好な学習を達成した。また、NNCM法は選点法であるので、通常は時刻 t の一点だけで方程式を満たすようにすればよいが、遅延微分方程式の場合には時刻 t を扱っている時に時刻 $t-\tau$ の値も考慮しなければならないという技術的困難もある。これは対象領域を大きくして領域分割が必要になった時に重要な課題となる。具体的な問題としては、次式で表されるMackey-Glass方程式を解いてランダムノイズを加えてモデル時系列を作成し、これをNNCM法によって解析した。

$$\dot{x}(t) = \frac{ax(t-\tau)}{1+(x(t-\tau))^c} - bx(t)$$

数値実験では遅延時間を30としたモデル測定データを使い遅延時間及びMackey-Glass方程式の解の再現を行い(Fig. 3)、また、この結果から時系列予測を行い満足すべき結果を得た。

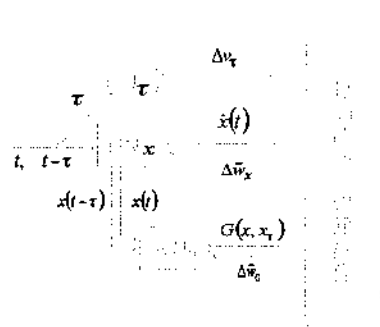


Fig.2 遅延を含む時系列のためのシステム

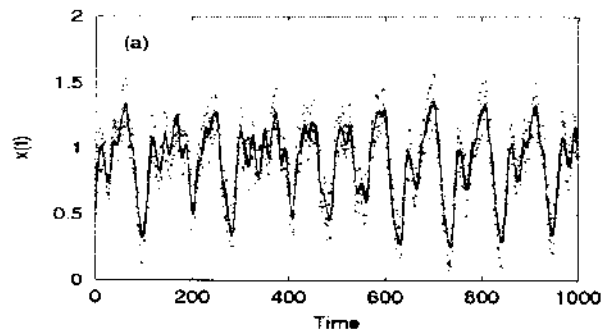


Fig.3 Mackey-Glass時系列データ再構築

参考文献

- [1] X-F. Ma, M. Fukuhara, T. Takeda, Neural network CT image reconstruction method for small amount of projection data, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A **449** (2000) 366-377.
- [2] X-F. Ma, T. Takeda, Asymmetric Abel inversion by neural network for reconstruction of plasma density distribution, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research **A492** (2002) 178-189.
- [3] X.F. Ma, T. Maruyama, G. Ma, T. Takeda, Three-dimensional ionospheric tomography using observation data of GPS ground receivers and ionosonde by neural network, Journal of Geophysical Research **110** (2005) A05308.
- [4] T. Takeda, X-F. Ma, Ionospheric tomography by neural network collocation method, ITC16 (Toki, 2006).
- [5] 竹田辰興、呉こん、ニューラルネットワークを使ったデータ同化及びパラメータ評価、第19回計算力学講演会（名古屋、2006）。

プラズマ対向材料再堆積層形成に伴う水素同位体及びヘリウム挙動に関する研究

九州大学大学院総合理工学研究院 片山一成

【緒言】 核融合炉の開発研究において、プラズマ・壁間での水素同位体挙動の把握は、プラズマ閉じ込め制御及びトリチウムの放射線安全対策の観点から重要な課題である。プラズマ-壁相互作用によりプラズマ中に放出された不純物粒子は、プラズマ対向壁表面に再堆積層を形成する。そのため、対向壁材料のみならず再堆積層における水素同位体挙動を理解しておかなければならない。また近年、壁材料に水素同位体と同時にヘリウムが照射された場合、ヘリウムが水素同位体挙動に少なからぬ影響を及ぼすことが明らかにされている。したがって、再堆積層形成に伴うヘリウム挙動の把握も必要とされる。これまでの研究により、水素 RF プラズマにより形成されたタングステン再堆積層には、多量の水素が蓄積されていることが明らかとなっている。また同様にヘリウムプラズマ照射下においては、ヘリウムが蓄積されることもわかってきた。しかしながら、その蓄積機構の解明には至っていない。本研究では、重水素及びヘリウムプラズマ照射下で形成されたタングステン再堆積層を対象として、昇温脱離(TDS)実験及び微細構造観察を通じて、再堆積層への水素同位体及びヘリウム蓄積機構について考察した。

【実験】 容量結合型 RF プラズマによりタングステン(ニロコ社製)をスパッタリングして、基板上に再堆積層を作製した。RF プラズマ装置の概略図を Fig.1 に示す。タングステン板(5cm×5cm,厚さ 0.1cm)を RF 電極に設置し、基板として石英片(2cm×0.5cm,厚さ 0.1cm)及びタングステン箔(2cm×0.5cm,厚さ 0.02cm)をグラウンド電極に設置した。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。また、グラウンド電極及び真空容器はアースした。再堆積量は放電前後の基板質量変化をマイクロ天秤で測定し算出した。さらに再堆積層はタングステン原子のみから構成されると仮定して、再堆積質量からタングステン原子数を算出した。再堆積層作製条件は、Table1 にまとめる。

タングステン基板上に作製した試料を用いて、昇温脱離(TDS)実験を行った。基板は 1cm×0.5cm,厚さ 0.02cm のサイズにカットし、実験装置に設置した。真空排気後、1400℃ まで 1℃/s で等速昇温した。

石英基板上に作製した試料を用いて、透過型電子顕微鏡(TEM)観察を行った。なお TEM 観察用薄膜試料は、集束イオンビーム加工(FIB)法により作製した。

【結果及び考察】 RF 電力 50W での重水素プラズマ、及び RF 電力 200W でのヘリウムプラズマにより作製したタングステン再堆積層 0.34mg、及び 0.77mg を用いて、TDS 実験を行った。重水素プラズマにより形成されたタングステン再堆積層からの重水素放出においては、HD($m/e=3$),D₂($m/e=4$), HDO($m/e=19$), D₂O($m/e=20$)を観測対象とした。Fig.2 にそれぞれの放出曲線を比較する。放出された重水素原子数に対する各放出化学形の割合は、それぞれ HD: 7.2%, D₂: 8.2%, HDO: 77.3%, D₂O: 7.3%であった。なお、加熱開始と同時に多量の H₂O の放出が観測されており、この H₂O と再堆積層表面に達した D との反応により HDO が形成されたと考えられる。本試料からの重水素の放出は低温で始まったことから、D-D あるいは D-H の再結合反応よりも、D-H₂O 間での速やかな同位体交換反応が HDO としての D 放出を促したものと考えられる。以前、RF 電力 200W での重水素プラズマにより作製したタングステン再堆積層からの TDS 実験を行ったが、放出開始温度は 150℃ 付近であった。この場合はおよそ 80%が D₂として放出された。これらの結果から放出開始温度により放出化学形が変化することを示唆している。観測した 4 成分の放出量から、捕捉されていた重水素原子数は、 1.12×10^{17} 個と見積もられた。また、再堆積層 0.34mg がすべてタングステンにより構成されたと仮定すると、再堆積中のタングステン原子数は、 1.11×10^{18} 個と算出される。以上より、再堆積層中の原子比 D/W は 0.10 と求まった。これまで、ガスクロマトグラフを用いた不活性ガス雰囲気での水素放出実験を行ってきたが、TDS 実験においてもほぼ同程度の重水素捕捉量を確認できた。この値はタングステンバ

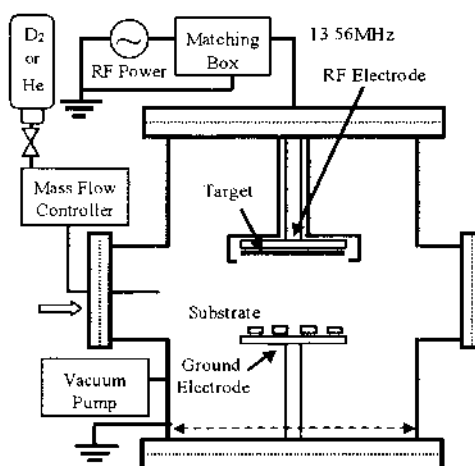


Fig.1 RF プラズマ装置概略図

Table 1 再堆積層作製条件

放電ガス	重水素	ヘリウム
RF 電力 [W]	50	200
圧力 [Pa]	10	
流量 [sccm]	1.2	
放電期間 [hour]	240	120
基板温度 [℃]	46	125
スパッタ面積 [cm ²]	12	
電極間距離 [cm]	11	

ルクへの水素吸収量に比べ遥かに大きく、吸収とは明らかに異なる現象により重水素が保持されていると言える。

ヘリウムプラズマにより形成されたタングステン再堆積層からのヘリウム放出曲線を Fig.3 に示す。重水素よりもやや高い 100°C 付近から放出が始まり、300°C 付近にピークを示した。重水素放電よりも放電中の基板温度が高いため、放出開始温度が上昇したと考えられる。このことは、放電中の基板温度をより低温に制御すれば、より多くのヘリウムが保持される可能性を示唆する。放出量より捕捉されていたヘリウム原子数は、 4.43×10^{17} 個と見積もられた。重水素と同様にして、再堆積層中の原子数比 He/W を算出すると、0.18 と求まった。再堆積層へのプラズマガスの多量捕捉現象は、水素特有のものではなく、不活性ガスにおいても生じることが明らかとなった。核融合炉においては水素同位体とヘリウムが同時に存在するため、ある条件下では多量の水素同位体及びヘリウムが同時に捕捉される可能性も否定はできない。

重水素プラズマ及びヘリウムプラズマによるタングステン再堆積層の TEM 画像をそれぞれ Fig.4(a)、(b) に示す(明視野像)。白い像はバブルを示しており、重水素形成再堆積層には、2nm 程度バブルが存在している。一方、ヘリウム形成再堆積層には、2-20nm 程度のバブルの形成されている。図中左下に示すそれぞれの試料の回折図形には強い回折リングが見られ、これは再堆積層がアモルファス構造を持つことを示す。また、ここには示していないが暗視野像中の白い像からはいずれの再堆積層も 2-3nm 程度の非常に微細な結晶粒で構成されていることがわかった。

RF プラズマ装置での基板近傍のおおよそのイオンフラックスは、50W で $\sim 10^{19} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 、200W で $\sim 10^{20} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ である。また、ガス圧 10Pa、温度 100°C での基板への分子入射フラックスは $\sim 10^{23} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ である。一方、タングステン原子の堆積フラックスを堆積量と放電時間から算出すると重水素プラズマで $\sim 10^{16} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 、ヘリウムプラズマで $\sim 10^{17} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ と見積もられる。すなわち、タングステン原子 1 個が堆積する間にイオンは 10^3 個程度、分子は 10^6 個程度、堆積表面に衝突していることになる。このことから、堆積表面には常に多量の分子が存在していると言える。低頻度で入射するタングステン原子は、基板温度が低いために表面拡散ができず、かつ多量の分子の存在により結晶の形成・成長が妨げられるために、微細な結晶粒が形成されたと考えられる。また、イオンは 10eV 程度の弱いエネルギーではあるが、堆積表面ごく近傍において入射・脱離を頻繁に繰り返し、その一部が結晶粒界に留まり蓄積されていくと思われる。金属中のヘリウムは自ら集合する傾向を持つため、重水素では見られなかった 20nm 程度の成長したバブルが形成されたと考えられる。微細な結晶粒が形成されることは同時に多くの粒界が存在することを意味する。重水素及びヘリウムが結晶粒界にバブルを形成して蓄積されているとすれば、結晶粒の成長が促進される条件下(高温・低压)では、蓄積量は減少すると推測される。従って、核融合炉内の条件を考慮すると、本実験で得られたようなタングステン再堆積層への多量の蓄積という現象は、炉内水素同位体挙動に関して支配的なものではないと考えられる。しかしながら、炉内には様々な環境が存在し、局所的には起こり得る現象である。トリチウム挙動の理解という観点からは重要な現象であり、今後も各種プラズマ対向壁候補材を対象とした研究を進める必要があると考える。

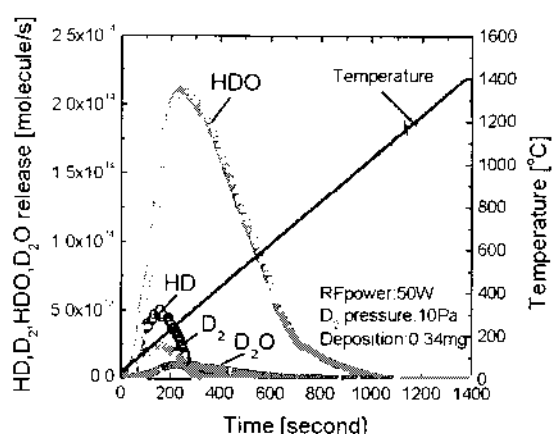


Fig.2 重水素プラズマによるタングステン再堆積層からの重水素放出曲線

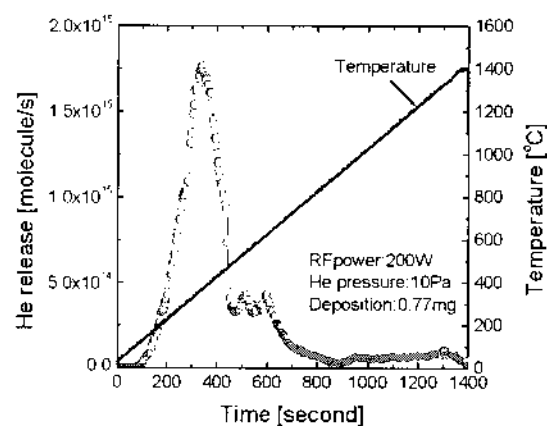


Fig.3 ヘリウムプラズマによるタングステン再堆積層からのヘリウム放出曲線

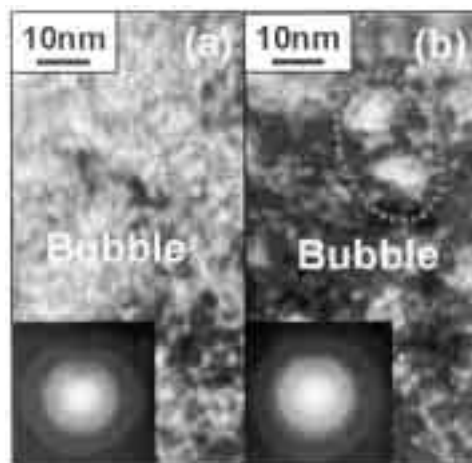


Fig.4 タングステン再堆積層の明視野 TEM 画像 (a) 重水素プラズマ、(b) ヘリウムプラズマ

研究集会「核燃焼プラズマ統合コード研究会」

京都大学

福山淳

研究集会「核燃焼プラズマ統合コード研究会」は、2006年12月21日、22日の2日間にわたり九州大学応用力学研究所で開催された。この研究会は核燃焼プラズマ統合コード構想 BPSI (Burning Plasma Simulation Initiative)の活動の一環として行われたものである (<http://bpsi.nucleng.kyoto-u.ac.jp/bpsi/>)。

はじめに

ITER ならびに核融合炉における核燃焼プラズマの振る舞いを予測し、その制御手法を確立する上で統合シミュレーションコードの開発はこれからの最重要課題である。米国では、従来からの輸送コードを中心にした NTCC (National Transport Code Collaboration) 活動に加えて、SciDAC (Scientific Discovery through Advanced Computing)における大規模シミュレーションの成果を取り入れる形で、統合シミュレーションコードの開発を目指す FSP (Fusion Simulation Project) が 2005 年から活動を開始している。一方、欧州においても JET における Transport Task Force (TR-TF) による統合輸送コードの開発に加えて、EFDA の活動として Integrated Tokamak Modelling Task Force (ITM-TF) が 2003 年末に発足し、2004 年初めから活動を開始している。今年度、特記すべき点は、ITER(International Thermonuclear Experimental Reactor)協定に関する署名が 7 極 (日、欧、米、露、中、韓、印) 間で、また BA(Broader Approach) 協定に関する署名が日・欧間で行われたことである。国内においては ITER-BA に関する議論も始まり、六カ所村に国際シミュレーション研究センターの建設も予定されている。自己点火に向けた核融合実験の機運も盛り上がり、今後のシミュレーション研究に大きな期待が寄せられているこの時期に、第 5 回核燃焼プラズマ統合コード研究会を九州大学応用力学研究所において開催し、国内の研究動向、研究の進め方ならびにこれからの ITER-BA に関する研究協力について議論できたことは意義深い。今後も ITER-BA の議論を深めつつ、核燃焼プラズマ統合コード研究会を継続して開催し、日本における研究のアクティビティを高めていく必要がある。

会議内容

会議初日は統合モデル、プラズマ周辺モデル、グリッド、乱流、MHD のカテゴリーで、2 日目はマルチスケール、その他のカテゴリーで研究成果報告がなされた。発表件数は 19 件、参加者は 23 名であった。以下に概略を紹介する。

統合モデル

TASK V1.0 のソースが 2006 年 9 月に公開。ソースは F77 より F95 に変更。TX、WX 等の新しいモジュールが整備されている。TX は 1 次元の輸送と流れを同時に解いているのでプラズマ回転や L-H 遷移などの遷移現象を取り扱うことが可能である。これまでに NBI 入射の場合の密度のピーキング現象を再現することに成功している。今後の課題として長時間

シミュレーションのための数値安定性の改良、乱流輸送モデルのテスト等があげられる。現在はまだ単独で動作しているが、3次元配位におけるNBI、ICRF加熱時における高エネルギー分布関数を計算可能なGNETコードの整備も進展している。今後TASKモジュールとして整備されていく予定である。さらにJAEAのTOPICコードより平衡、NBIの部分を切り出し、新しいモジュールとしてTASKへ結合する作業が始まっている。また、並行してヘリカル系における統合コード開発も進んでいる。正味のプラズマ電流を評価するコードが開発されており、このコードの応用としてトカマクにおけるトロイダルリップル損失を考慮したブートストラップ電流の評価が可能となる。今後、MHD安定性、乱流輸送、SOL、ダイバータ輸送等のモジュールとのインタフェース開発を進めていく予定である。

プラズマ周辺モデル

ダイバータによる粒子と熱の制御を行うため、統合モデルによるダイバータシミュレーションコードの開発が必要である。JAEAにおいてはSONICと呼ばれる統合コード開発が進んでいる。さらに流体コードのクロージャーを構築するために粒子シミュレーションコードPARASOLも開発されている。PARASOLを用いてHモードプラズマにおけるELM崩壊後のダイバータ板へ到達する増加熱フラックスの問題が調べられ、速い時間スケールと遅い時間スケールの応答に対する特徴的時間における衝突やリサイクリングの効果が明らかにされた。SONICを用いたシミュレーション研究ではJT-60UにおけるX点MARFEでのカーボン輸送解析、壁の飽和条件下でのダイバータポンピングの特性評価、JT-60SAのダイバータ性能評価等の結果が報告された。放射化されたダストの取り扱いが核融合炉の安全性の観点から重要なテーマであり、NIFSではプラズマ壁からのダストの放出条件の評価が行われている。またジャイロ運動論を用いた磁気シース形成の研究も進展しており、解析モデルとPICの結果はよく一致している。

グリッド

JAEAでは原子力グリッド基盤(Atomic Energy Grid InfraStructure: AEGIS)の研究開発を推進している。ここで、AEGISの主要な適用分野の一つとして、核融合研究分野における遠隔協調研究環境の構築を目指した研究開発を行っておりその成果の一部が報告された。

乱流

ETG乱流シミュレーションデータに対し統計解析が行われ次元やPDFが評価された。Weak magnetic shearではnormal shearの場合に比べ次元が低減し、PDFの指数テールも消えることが示された。Zonal FlowとGAMの相互作用と輸送レベルの関係がシミュレーション結果をもとに調べられ、GAMによるzonal flowの減衰率がRosenbluth-Hintonの結果と一致することが確認された。

MHD

電磁場が介在する現象を取り扱える新しいジャイロ運動論モデルが提案された。total characteristic methodが電子に適用された。この手法によりエネルギー保存則が改善され、マーカー粒子数における周波数の収束性も通常の δf より高速となった。MHD安定性コードMARG2DコードをITERのMHD制御に適用するために、FPGAのような専用チップの可能性が検討された。FPGA1枚でおおよそAltix 3700 Bx2(2PE)の約4.5倍の性能向上が期待

されことが示された。ジャイロ簡約化 MHD コードによる運動論的内部キンクモードのシミュレーションが行われ、非線形フェイズにおけるセカンダリー不安定性としての Kelvin Helmholtz 不安定性による渦生成の効果が報告された。

マルチスケール・その他

マルチスケールグローバルシミュレーションによるダブルテアリングモードの運動論的バルーニングモードによる励起に関する研究報告があった。乱流、MHD、メゾスケールの非線形相互作用の重要性が示された。ドリフトテアリングモードの非線形シミュレーションの結果が報告され、MHD における帯状流生成機構に関する考察が示された。グローバル ITG コードを用いた内部輸送障壁の生成、崩壊の輸送シミュレーションが報告され、非局所的な非線形相互作用が崩壊をトリガーすることが示された。モデル粘性を用いた新古典テアリングモード非線形シミュレーション結果が報告され、テアリングモードが衝突性ドリフト波のビート相互作用により加速することが示された。森の射影演算子法を用いた少数自由度カオスモデルの解析結果が報告された。

統合コード活動状況

活動環境

大学、核融合研、原子力機構等による連携

(京大, 九大, 山口大, 東大, 東工大, 慶応大, 筑波大, 核融合研, 原子力機構, 電中研等)

活動形態

科学研究費補助金基盤研究(B)(1)「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」(研究代表者 矢木雅敏、研究期間平成16年度-18年度)(今年度で終了)

科学研究費補助金特別推進研究「乱流プラズマの構造形成と選択則の総合的研究」(研究代表者 伊藤早苗、研究期間平成16年度-20年度)

日米ワークショップ

Integrated Simulation of Fusion Plasmas (2007/1/29-31, ORNL, USA)

日韓ワークショップ

Theory and Simulation of Magnetic Fusion Plasmas (2006/8/16-17, Daejeon, Korea)

九大応力研共同研究 特定研究 (平成18年～19年度)

核融合研共同研究、原子力機構共同研究

中期的サポートが必要

理論・データ解析・コード開発：若手研究者

参考資料

第5回統合コード研究会

5th Burning Plasma Simulation Initiative Annual Meeting

平成18年12月21～22日、九州大学応用力学研究所2階会議室

--- #201, RIAM, Kyushu University, Kasuga, Fukuoka, Japan, 2006/12/21-22 ---

12/21

9:00 矢木雅敏（九大） はじめに

統合モデル

9:10 福山 淳（京大） 統合コードTASKの現状と将来

9:40 本多 充（京大） TASK/TXによるトカマク輸送シミュレーション

10:10 村上 定義（京大） GNET+TASK/WMによるICRF加熱シミュレーション

10:40 休 憩

プラズマ周辺モデル

10:50 滝塚 知典（原子力機構） PARASOL シミュレーションの現状と計画

11:20 川島 寿人（原子力機構） JT-60U/JT-60SAでのSONICコードによるSOL/ダイバータシミュレーション研究の現状

11:50 富田 幸博（核融合研） SCOPICコードによる微粒子の壁からの離脱条件

12:20 昼 食

13:10 事務手続き

13:30 河村 学思（京大） 磁気シース形成におけるジャイロ運動論的アプローチ

グリッド

14:00 山岸 信寛（原子力機構） 核融合分野における遠隔協調研究環境への原子力グリッド基盤(AEGIS)の適用

統合モデル（ヘリカル系）

14:30 中村 祐司（京大） ヘリカル系プラズマにおける電流の時間発展

乱流

15:00 松本 太郎(原子力機構) Characteristics of Turbulent Fluctuations in the Presence of Zonal Flows

15:30 休 憩

15:40 李 継全 (京大) Zonal Flow and GAM Dynamics in Tokamak Plasmas

MHD

16:10 藤堂 泰 (核融合研) 補完流体法による運動論的電磁プラズマモデルの構築

16:40 徳田 伸二(原子力機構) 磁気流体力学安定性解析コードMARG2Dにおける固有値問題ソルバーのハード化

17:00 内藤 裕志(山口大) 内部キンクモードに対するイオンのランダウ減衰と渦生成効果

17:30 議 論

18:00 散 会

19:30 懇親会

12/22

マルチスケール、その他

9:00 石澤 明宏(核融合研) 磁気流体不安定性、微視的乱流および帯状流の相互作用のシュミレーション

9:30 西村 征也 (九大) ドリフト-テアリングモードにおける輸送の効果

10:00 徳永 晋介 (九大) グローバルITG乱流コードを用いた輸送シミュレーション

10:20 休 憩

10:30 林 高行 (九大) テアリングモードと衝突性ドリフト波の相互作用の研究

10:50 濱田 大地 (九大) 森の射影演算子法を用いた衝突性ドリフト波カオスの研究

11:10 議論およびまとめ

11:40 今後の活動予定 (応力研・特定研究の進め方)

12:00 昼 食

13:00 解 散 (科研費報告書に関する議論、科研費分担者のみ)

核融合炉材料のヘリウム損傷

研究代表者 京都大学エネルギー理工学研究所 森下 和功

ITERの建設が決まり、核融合研究はいよいよ核燃焼プラズマを対象とする段階に入った。核燃焼環境下で使用する材料中には、D-T 反応によって発生したヘリウム(α 粒子)の入射や、中性子の照射による核変換ヘリウムの生成によってヘリウムが混入する。ヘリウムは材料中に固溶せず結晶中を容易に移動する一方で、転位や不純物原子などの先在的な格子欠陥やはじき出し損傷欠陥などと強く相互作用するため、材料の内部組織を大きく変化させ、材料の寸法安定性、機械的性質、伝熱的性質などの劣化、さらには、水素リサイクリングなどにも大きな影響を及ぼすことが懸念されている。

このような背景を踏まえ、標記研究会を平成 18 年 6 月 6 日に九州大学応用力学研究所で開催した。本研究集会では特定研究「照射効果－水素・ヘリウム・不純物元素相互作用」とも連携し、最新の研究成果を持ち寄ることによって、核融合炉材料におけるヘリウム照射損傷、ヘリウム欠陥相互作用など材料中のヘリウムの挙動について水素との比較も視野に入れた議論を総合的に行い、核融合材料におけるヘリウム挙動に関する研究ネットワークの構築を目指している。国内の7つの大学や大学共同利用機関である核融合科学研究所、公的研究機関である日本原子力研究開発機構からの参加があり、総勢 26 名での研究集会が行われた。今回は、今までの研究成果についての情報交換や意見交換を行うとともに、研究開発の進め方等についての総合的な議論もなされた。

まず、九州大学の吉田氏により本年度よりスタートした特定研究「照射効果－水素・ヘリウム・不純物元素相互作用」についての概要の説明があり、その後当該分野に関連する各講演が行われた。レビュー講演として、九州大学の田邊氏は材料中に打ち込まれたヘリウムの再放挙動についての従来までの国内外の研究成果をまとめたあげた内容での講演を行い、同大学の吉田氏は核融合実験装置(TRIAM/LHD)における照射実験と実験室系の制御実験とを比較し、プラズマ・壁相互作用で重要になるそれぞれの要素過程と問題点の明示を行った。

静岡大学の矢野氏は SiC 中の水素同位体挙動に及ぼすヘリウム照射影響についての発表を行い、ヘリウム照射による SiC の構造変化が重水素の保持特性に影響を与えることを明らかにした。同大学の吉河氏はボロン膜中における重水素・ヘリウム照射効果に関する解析を多角的に行い、照射エネルギー依存性や酸素含有量の影響などに関する講演を行った。

透過型電子顕微鏡を用いてヘリウムバブルの基礎的な挙動を明確にしようとする試みが複数の研究者によって行われた。島根大学の小野氏は鉄中のバブルと不純物元素や粒界との総合作用に関する研究を行い、九州大学の岩切氏はタングステン中におけるヘリウムバブルの照射温度・照射エネルギー依存性、島根大学の宮本氏はバブルとサブカスケードとの直接的な相互作用によるバブルの移動機構という新現象、東北大学の二田氏はTEM内引っ張りその場観察法を用いたバブル(高圧、低圧のものを双方)と転位との相互作用に関する講演をそれぞれ行った。さらに、電子顕微鏡では観察ができないような微細なバブル(ボイドも同様)や、バブル内に存在するヘリウムや水素などのガス原子を陽電子消滅分光法を用いて分析する試みが京都大学の義家氏によって行われた。

ヘリウムバブルに起因する最も顕著な(大きなスケールで生じる)現象である表面形状変化に関しても複数の講演があり、大阪大学の上田氏は水素・炭素混合ガスにヘリウムを添加したビームをタングステンに照射し、プリスタリングに関する新規的な現象とそのメカニズムを明らかにした。名古屋大学の矢野氏は 10～100eV の極低エネルギーのヘリウム・水素を広範な温度領域で照射し、従来までのプリスタリング研究では得られていないような実験領域における特徴的な表面形状変化を示した。九州大学の徳永氏は、ヘリウム照射後の試料に引っ張り応力を負

荷し、照射後の表面形状のさらなる変化や応力負荷時におけるヘリウムの再放出挙動などの研究を行った。また、名古屋大学の武藤氏はタングステン上に形成されたプリスターの詳細な構造観察を TEM や FEM を用いて行ったほか、プリスターのガス保持特性について有限要素法を組み合わせたモデリングによって解析した。

ヘリウムや水素などの材料中のガス原子を取り扱ったモデル計算に関する講演も複数行われた。核融合科学研究所の加藤氏は第一原理分子動力学計算を行い、原子空孔近傍における水素原子の結合エネルギーや水素原子の存在位置などを原子レベルで示した。京都大学の森下は分子動力学法を用いてヘリウムバブルの核形成過程を明らかにしたほか、キネティックモンテカルロ (event-KMC) 計算によりバブル成長における“統計的ゆらぎ”を考慮したシミュレーションを行った。同大学の徐氏は、拡散を考慮した反応速度論を用いて、中性子やヘリウムプラズマが第一壁やダイバータに及ぼす欠陥蓄積過程についての計算を行い、相乗照射効果に関する有意な知見を示した。

そのほか、日本原子力研究開発機構の濱口氏により加速器駆動未臨界システム (ADS) における における 核破砕中性子源材料の開発課題の概要についての説明があり、固体ターゲット中に発生するヘリウムに関する報告も行われた。さらに、東北大学の長谷川氏は、低放射化フェライト鋼などの核融合炉構造材料中に生成される核変換ヘリウムが機械的特性に及ぼす影響について、引っ張り試験後の破断面観察結果などから重要な知見を示した。また、タングステンの結晶粒を100nm程度の微細な結晶粒に抑えることで、表面損傷を起こす照射量が従来の材料の約10倍以上になることを示した。

今回の研究集会により非常に有意義な情報交換ができたことから、今後もこのような交流の場をもうけることが重要であり、継続すべきであるとの意見で一致し、来年度の共同利用研究も今年度と同規模の開催を申請することが決定した。

平成18年度九州大学応用力学研究所研究集会

「核融合炉材料のヘリウム損傷」

日時:2006年6月6日(火)9:30~17:30

場所:福岡県春日市春日公園6-1

九州大学応用力学研究所2F 大会議室

開始	終了	講演者	所属	タイトル
座長 森下和功				
9:30	9:40	吉田直亮	九大 応力研	「特定研究4:照射効果-水素・ヘリウム・不純物元素相互作用」の概要
座長 徐 虬				
9:40	10:00	田辺哲朗	九大 総理工	イオン打ち込みされたヘリウムの再放出
10:00	10:20	大矢恭久	静大理	SiC 材料中におけるヘリウムおよび重水素照射による化学的挙動
10:20	10:40	吉河 朗	静大理	ボロン膜中の重水素挙動に及ぼすヘリウム照射効果
座長 長谷川晃				
10:40	11:00	徐 虬	京大炉	タングステンにおけるヘリウムプラズマと中性子照射の相乗効果
11:00	11:20	森下和功	京大 エネ研	ヘリウムバブルの核生成・成長
11:20	11:40	加藤太治	核融合 研	α 鉄中の原子空孔と水素原子クラスタの第一原理 MD 計算
(昼 食)				
座長 奥野健二				
13:00	13:20	吉田直亮	九大 応力研	核融合実験装置における照射実験 (TRIAM/LHD)
13:20	13:40	大野哲靖	名大エコ トピア研	ヘリウムプラズマ照射によるタングステン及びタングステン被覆黒鉛表面損傷と ELM 模擬熱パルス照射効果
13:40	14:00	宮本光貴	島根大 総理工	カスケード損傷形成下におけるカスケード損傷形成下における He バブルの動的挙動
座長 大野哲靖				
14:00	14:20	義家敏正	京大炉	陽電子消滅分光法を用いた原子空孔集合体内のガス原子の検出
14:20	14:40	武藤俊介	名大工	Structural analysis and formation mechanism of surface blisters on tungsten surface blisters on tungsten by TEM and FEM

14:40	15:00	徳永和俊	九大 応力研	低エネルギーヘリウム照射されたプラズマ対向材料の 応力負荷による表面損傷とヘリウム放出挙動
(コーヒーブレイク)				
座長 武藤俊介				
15:20	15:40	長谷川晃	東北大 工	核融合炉候補材料の中性子照射効果に及ぼす核変 換 He の影響
15:40	16:00	二田伸康	東北大 金研	TEM内引張その場観察による He バブルと運動転位 の相互作用に関する研究
16:00	16:20	濱口 大	原子力 機構	核破碎中性子源における材料開発課題
座長 高村秀一				
16:20	16:40	小野興太郎	島根大 総理工	ステンレス鋼中の照射ヘリウムの挙動と不純物効果
16:40	17:00	岩切宏友	九大 応力研	透過型電子顕微鏡によるヘリウムバブルの生成・成長 過程の観察
17:00	17:20	上田良夫	阪大工	プラズマ対向材への水素・ヘリウム同時照射効果
座長 吉田直亮				
17:20	17:40	ディスカッション 本研究会や特定研究の今後の進め方		
17:20	17:40	吉田直亮	九大 応力研	(閉会の辞)

参加者リスト

所 属	氏 名
東北大学	長谷川晃
東北大学	二田伸康
日本原子力研究開発機構	濱口 大
静岡大学	大矢恭久
静岡大学	吉河 朗
核融合科学研究所	加藤太治
名古屋大学	武藤俊介
名古屋大学	大野哲靖
名古屋大学	高村秀一
京都大学	徐 虬
京都大学	森下和功
大阪大学	上田良夫
島根大学	小野興太郎
島根大学	宮本光貴
九州大学	田辺哲朗
九州大学	吉田直亮
九州大学	徳永和俊
九州大学	岩切宏友
九州大学	時谷政行
九州大学	蛭原 綾乃
九州大学	片伯部 陽一
九州大学	東嶋 彬
九州大学	秋吉 亮平
九州大学	大多和 義久
九州大学	八尋 由樹
九州大学	鱒渕 俊児