

[28]全国共同利用研究成果報告

<https://hdl.handle.net/2324/7431320>

出版情報：全国共同利用研究成果報告. 28, pp.1-, 2025-03. Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University

バージョン：

権利関係：



新しい原子力材料における重イオン照射による損傷組織の発達過程

京都大学複合原子力科学研究所
九州大学応用力学研究所徐 虬
渡邊 英雄

1. 目的

CoCrFeMnNi ハイエントロピー合金 (HEA) は、高強度、優れた延性と靱性、耐熱性及び耐食性を示すことから、新しい金属材料として注目がされている。また、この HEA における原子空孔集合体の形成と照射による偏析が起きにくいことからこの合金の耐照射性も優れている。一方、CoCrFeMnNi と同じ系の CoCrNi と CoCrFeNi ミディアムエントロピー合金 (MEA) においても、CoCrFeMnNi に劣らない力学特性を持つ。しかし、これらの MEA における高温照射による組織の不安定性が報告された。本研究では、CoCrFeNi 合金に析出させた (CoCrFeNi)₉₅Ti₁Nb₁Al₃HEA に対して、高温でのイオン照射による組織の安定性に及ぼす影響を調べた。

2. 実験方法

高純度 (>99.9%) の Co, Cr, Fe, Ni, Ti, Nb 及び Al により真空誘導炉の MgO りつぽで熔融された。その後、1473K で真空中 12 時間均一化処理を行った。インゴットから厚み 1mm の正方形試験片 (10mmx10mm) を切り出し、0.1mm まで圧延した。3mmΦディスク試料を打ち抜き、真空中に 1273K で 1 時間焼鈍を行った。また、一部の試料に析出させるため、1023K で 8 時間時効を行った。図 1 に時効前後の組織を示す。95%の酢酸と 5%の過塩素酸の溶液に 60V の電解研磨により薄膜試料を作製した。これらの薄膜試料に対して 2.4MeV の銅イオンにより 673K 及び 873K で 1.6×10^{19} ions/m² まで照射を行った。損傷ピークは表面から約 800nm で、ピークの損傷量は約 1dpa であった。照射の後に、透過型電子顕微鏡とエネルギー分散型 x 線分析装置 (EDS) を用いて、組織観察及び組成変化の分析を行った。

3. 実験結果と考察

図 2 に 673K で照射した時効前後の (CoCrFeNi)₉₅Ti₁Nb₁Al₃ 微細組織を示す。比較のため、同じ条件での CoCrFeNi MEA の組織も示す。試料の平均厚さは 130nm であった。いずれの試料においては、673K で照射後に、転位ループが形成された。また、各試料においては、照射によって形成された欠陥の密度 ($1.2-1.3 \times 10^{22}/\text{m}^3$) はほぼ同じであった。CoCrFeNi の欠陥平均サイズ ($20 \pm 5\text{nm}$) はわずかに大きかった。時効しなかった試料と時効した試料の欠陥サイズはそれぞれ $15 \pm 2\text{nm}$ と $10 \pm 2\text{nm}$ であった。この結果から HEA においては、観察可能と不可能な析出物が転位ループの成長を抑制することが分かった。照射温度は 873K に上げると、各合金における欠陥の形成が大きく異なった。以前、報告されたように、MEA に Cr に富む析出物が形成された。時効がなし HEA においては、照射によって形成された転位ループの密度は $1.3 \times 10^{22}/\text{m}^3$ から $5.4 \times 10^{22}/\text{m}^3$ に減少した。転位ループの平均サイズは 15nm から 25nm に増加した。これらは、転位ループ密度とサイズの通常温度依存性と同一である。しかし、時効した HEA においては、転位ループの形成が全く観察されず、平均サイズ 4nm の析出物だけが観察された。このサイズは時効により形成された析出物 (15nm) よりはるかに小さかった。従って、これらの析出物が照射によるものと考えられる。また、すべての試料においては、照射後に、透過型電子顕微鏡に付けたエネルギー分散型 x 線分析装置 (EDS) を用いて、組成分析を行った。いずれの試料においても、明確な偏析が観察されなかった。

以上の結果により析出させた (CoCrFeNi)₉₅Ti₁Nb₁Al₃ HEA が CoCrFeNi MEA より耐照射性が良くなったことが分かった。また、HEA においては、析出物が観察されなくても照射による転位ループの形成が抑制され、組織は安定する。

4. まとめ

時効により析出物が形成された析出強化型合金 (CoCrFeNi)₉₅Ti₁Nb₁Al₃ は、CoCrFeNi MEA より優れた耐照射性を持つことが期待された。本研究では、時効がなしとありの薄膜試料に 673K と 873K で高エネルギー重イオンにより照射し、その耐照射性を CoCrFeNi MEA と比較した。温度が低い 673K での照射においては、照射によって形成された欠陥の密度の差がほぼなかったが、HEA の方が欠陥の成長が抑制された。これに対して、873K での照射により CoCrFeNi MEA が顕著な偏析が観察された。HEA の優れた耐照射性が明らかになった。

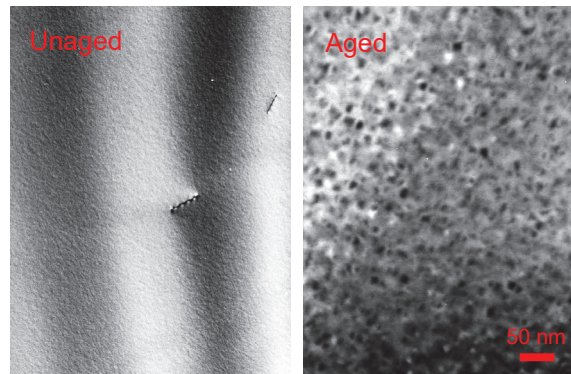


図1 HEAにおける時効する前と後の微細組織

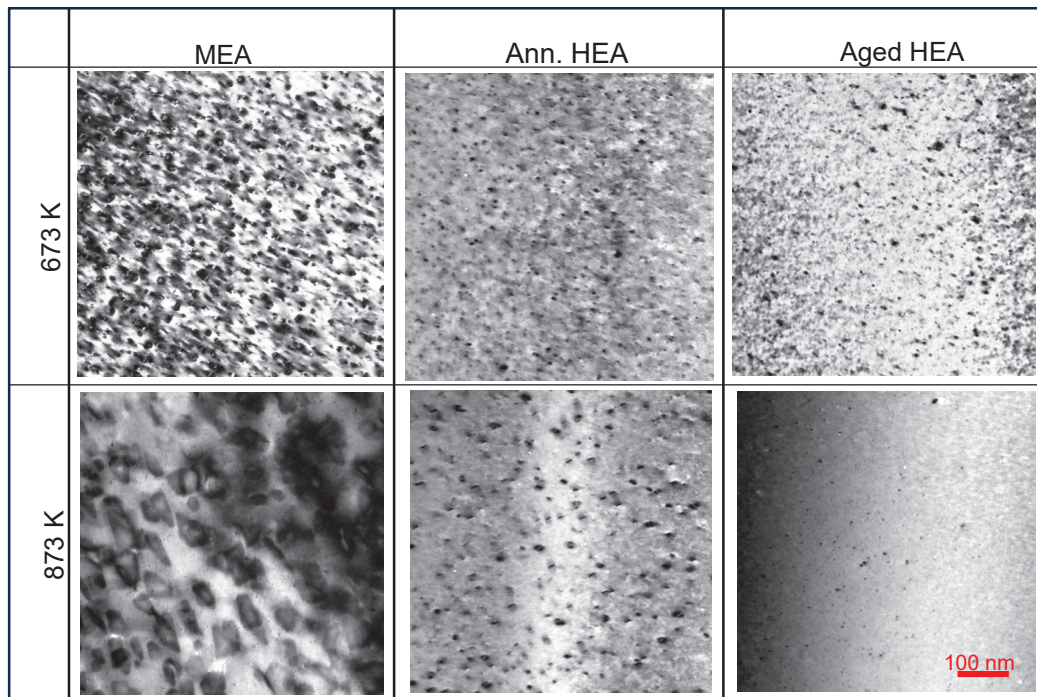


図2 673K と 873K でイオン照射後の薄膜 MEA と時効がなし、ありの HEA の微細組織。観察領域の平均厚さと損傷はそれぞれ 130nm と 1dpa であった。

簡約化ドリフト MHD モデルによる捕捉粒子モード駆動輸送シミュレーション研究

量子科学技術研究開発機構 矢木雅敏

目的

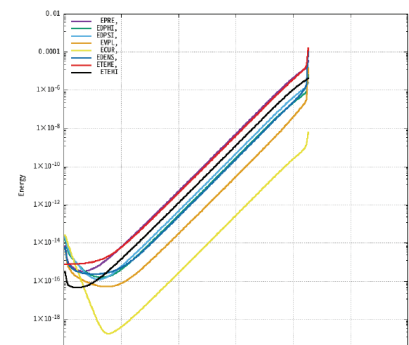
トカマク型核融合炉においては燃料供給のためプラズマ周辺部にペレット入射を予定しており、プラズマ周辺部に密度のハンプが形成され反転密度勾配が実現される。このような状況では粒子ピンチ（内向きの粒子フラックス）が起こることが理論的に示されている。粒子ピンチ効果を外部から制御できれば核燃焼プラズマ制御が可能となるのでこの研究は重要な研究課題と考えられる。本研究においては反転密度勾配駆動ドリフト波が不安定性として存在しうるか、この不安定性がどの程度の大きさの内向きのフラックスを作り出せるのか、シミュレーション解析により検討し、実験検証の可能性を探ることを研究目的とする。

研究成果

これまで粒子ソースをプラズマ周辺部へ印加し[1]、プラズマ乱流が駆動する粒子ピンチ効果を調べてきた。不安定性が駆動する準線形粒子ピンチ効果に着目したが、これは不安定性が存在する領域付近に限定されること、一方、非線形性による3波結合や乱流 spreading が非局所輸送に寄与することなどを明らかにした[2]。シミュレーション研究と並行して乱流モデルを拡張するため6場から8場へ拡張し、粒子輸送に寄与する捕捉電子応答を導入した。電子を2流体とみなし、通過電子(Circulating Electron)と捕捉電子(Trapped Electron)の密度及び温度をそれぞれ $n_{ec}, T_{ec}, n_{et}, T_{et}$ とすると準中性条件は $n_i = n_{ec} + n_{et}$ と書ける。ここで、 $n_{ec0} = f_{ec} n_{e0}, n_{et0} = f_{et} n_{e0}, f_{ec} + f_{et} = 1$ が成り立つ。さらに $T_{ec0} = T_{et0} = T_{e0}$ とする。電子に対する一般化ポテンシャルは、それぞれ $F_{ec} \equiv \phi - \frac{\delta}{f_{ec}} p_{ec}$ 及び $F_{et} \equiv \phi - \frac{\delta}{f_{et}} p_{et}$ で与えられる。これらを用いると連続の式は

$$\frac{dn_{ec}}{dt} = 2\beta f_{ec} [rcos\theta, F_{ec}] - \beta \nabla_{\parallel} (v + \delta f), \quad \frac{dn_{et}}{dt} = 2\beta f_{et} [rcos\theta, F_{et}], \quad \frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + [\phi,]$$

となる。捕捉電子は電流には寄与しないので電流に関する項は現れない。図に8場モデルにおける全揺動エネルギーの時間発展を示す。線形モードが発展し、非線形フェイズに入るところでオーバーフローにより計算が止まっている。今後、メッシュサイズや時間ステップなど、線形成長率の収束性を調べる必要があるがコードとしては動作することが確認できた。



図：全揺動エネルギーの時間発展

[1]矢木雅敏, 令和5年度共同利用研究成果報告第27号, 2023CR-FP-25.

[2]宮本琉耶, 糟谷直宏, 矢木雅敏, “トカマクプラズマの乱流粒子流束維持における非線形機構評価”, 第41回プラズマ・核融合学会年会、タワーホール船堀、東京, 2024/11/17-20.

研究組織

矢木雅敏(量研機構)、糟谷直宏(九大応力研)、佐々木真(日本大)、糟谷和賀子(応用流れ研究所)

誘電体バリア放電式大気圧プラズマを応用した芸術作品の開発

九州大学 芸術工学研究院 栗山 齊

・目的

研究代表者は、九州大学の令和3年度大学改革活性化制度「メディアアートによるテクノロジーの芸術表現への昇華を通じた新しい価値の可視化」のプロジェクトメンバーである。本プロジェクトでは、芸術の拡張性と操作性に注目し、異なる分野や領域を結びつけ、大学全体を活性化させることを目指している。アートとテクノロジーを融合する研究を進め、素材や技術などのテクノロジー・シーズを芸術表現に昇華させ、新しい価値を可視化するためのプロジェクトチームを編成し、実践的な研究を推進してきた。本研究では、上記プロジェクトの一環として、応用力学研究所の核融合力学分野の研究者と協力し、プラズマに関する専門的な知識や技術を取り入れ、芸術表現に応用する実験的な造形手法を確立することを目指している。特に誘電体バリア放電式大気圧プラズマという現象に着目し、これを光の造形要素として活用することで、見えない大気を可視化し、不思議な自然現象を芸術表現として社会に提示することが計画されている。さらに、本研究によって本学の研究成果を広く社会に普及させることも目的としている。

・実験方法

「透明な断面観察装置」の開発

誘電体バリア放電式大気圧プラズマの断面を観察できる装置の開発を行った。これは、透明な素材を電極に用いることによって、側方からだけでなく、上方からも明滅を繰り返す誘電体バリア放電の断面を観察するための装置である。まず、塩水を半透明な電極として用いる実験から開始し、データを収集し分析を行った。次に、FTO透明導電性ガラスを電極に用いる実験を行うことによって、ガラスの表面抵抗値の違いによるプラズマの見え方の差異を検証した。同時に、エーベルトフトガラス美術館（デンマーク）の協力を得ながら放電現象を用いた芸術作品の開発も行い、国内外で展示発表を行なった。

・実験結果

塩水を電極とする実験では十分な大気圧プラズマが発生し、良好な結果が得られた。しかし、長期間展示する作品の素材として水溶液は不向きである。そのため、FTO透明導電性ガラスの使用を検討した。FTO透明導電性ガラスはガラスの片面だけに導電性のコーティングが施されているため、誘電体（絶縁体）と電極が一体になった特性を有する。この特性を活かすことによって、複数のレイヤーからなる誘電体バリア放電を実現できることが分かった。

・考察

FTO 透明導電性ガラスは誘電体バリア放電に適した素材であり、造形の可能性や自由度が高くなる素材である。大容量の電源を用いれば、複数の FTO 透明導電性ガラスを積層し、立体的な誘電体バリア放電を現出することが可能となる。誘電体バリア放電の基礎的な実験結果を基にして、今後、芸術作品として展示発表するための設えや構造などを継続して検討する必要がある。

・研究成果報告

1. 栗山 斉（作品展示発表 [恒久的設置]）, 0=1 -tunnelling effect, Cartway Project, 230 SUSSEX ST, シドニー [オーストラリア], 2024 年 7 月 7 日
2. 栗山 斉（作品展示発表）, noise of the void [ver.2], WHEN YOU LOSE CONTROL, glas（エーベルトフトガラス美術館）, エーベルトフト[デンマーク], 2024 年 10 月 10 日～2025 年 3 月 9 日
3. 栗山 斉（作品展示発表）, 0=1 -trace of light, Intersecting Time, 東京藝術大学大学美術館, 東京, 2024 年 11 月 2 日～2024 年 11 月 17 日
4. 栗山 斉（雑誌掲載）, NEUES GLAS - NEW GLASS: art & architecture No.4/2024, NEUES GLAS - NEW GLASS: art & architecture No.4/2024, 2024 年 11 月 1 日
5. 栗山 斉（事業報告書掲載）, 株式会社現代企画室（2024 年 11 月）, pp46-47, ISBN: 978-4-7738-2410-0 C0070, 株式会社現代企画室（2024 年 11 月）, pp46-47, ISBN: 978-4-7738-2410-0 C0070, 2024 年 11 月 1 日

・研究組織

栗山 斉（九州大学芸術工学研究院、准教授、プロジェクトリーダー、
専門：現代美術・造形）

小菅 佑輔（応用力学研究所、准教授、プロジェクトとりまとめ、
専門：プラズマ物理）

恩地 拓己（応用力学研究所、助教、実験機器開発・実験担当、
専門：プラズマ工学）

松隈 浩之（九州大学芸術工学研究院、准教授、部局連携アドバイザー、
専門：コンテンツデザイン）

水田 雅也（九州大学芸術工学研究院、テクニカルスタッフ、実験機器制作補佐、
専門：現代美術）※2024 年 7 月より宮下 恵太と人員交代

藤墳 祥子（九州大学芸術工学研究院、テクニカルスタッフ、事務管理担当、
専門：アートマネージメント）※2024 年 7 月より井上 野花と人員交代

分散強化銅合金における重イオン照射効果

核融合科学研究所 研究部 菱沼 良光

1. 研究目的

核融合炉における Cu 合金の役割は、その大きな熱伝導性や電気伝導性を有する特徴から非常に大きく、最近ではその高性能化や量産化研究がクローズアップされている。具体的には、W/Cu 合金のダイバータ構造体に資する高い中性子照射耐性や機械的な高強度を満たすことを指向したヒートシンクが挙げられるが、その他にも超伝導コイルに用いられる Nb₃Sn 等の各種超伝導素線の熱的・電氣的安定化材として視野に入れている。

超伝導コイルを構成する Nb₃Sn 素線には液体ヘリウムによる冷却性能や通電時のクエンチに対して細心の注意が払われ、残留抵抗比 (Residual resistivity ratio: RRR) が 100 以上の純銅が素線に安定化材として付されている。この安定化材が、大きな熱伝導性や電気伝導性を維持しながら高い中性子照射耐性や機械的な高強度を満たせば、核融合環境下での高い通電安定性や線材強度の向上に寄与することができる。しかし、一般的な Cu 合金における機械強度と導電性の間にはトレードオフの関係があることが知られており、高い電気伝導性を維持しながら高強度化を図るには「粒子分散強化」や「析出強化」等が広く検討されている。

これまで我々は、幅広い分散粒子選択を意図とした機械的合金化 (Mechanical Alloying: MA) と熱間等方静水圧焼結 (Hot Isostatic pressing: HIP) を組み合わせた MA-HIP 法を開発し、MA-HIP 法による Cu-Y₂O₃ 分散強化銅合金の合成に成功し、純銅と比較して導電率を損ねることなく機械的強度が向上していることが明らかとなった。更なる進展には MA-HIP 法による Cu-Y₂O₃ 分散強化銅合金の微細組織及び機械強度における中性子照射効果を明らかにする必要があり、本研究を中性子照射の加速試験と位置付けて純銅や市販の分散強化銅合金 (Cu-0.15wt%Al₂O₃: Gridcop AL-15) との特性を比較する。

2. 実験方法

Gridcop (Cu-0.15wt%Al₂O₃) 分散強化銅合金の微細組織及び機械特性における照射効果を応用力学研究所に設置されている高エネルギーイオン発生装置 (タンデム加速器) を用いた Cu²⁺イオン照射実験を実施するために、照射実験条件を TRIM 計算コード (SRIM-2013) にて算出した。その後、照射実験に供する Gridcop 試料を核融合研で試作した W/Gridcop 接合構造体から切り出し、鏡面研磨を実施した。室温条件下で鏡面研磨された面に対して未照射、3 dpa 及び 10 dpa 相当の Cu²⁺イオン照射実験を実施した。

イオン照射後の Gridcop 試料は、Bruker TI-950 微小押し込み硬さ試験で硬度変化を検討した。また、一部の試料については、TEM による微細組織観察を実施し

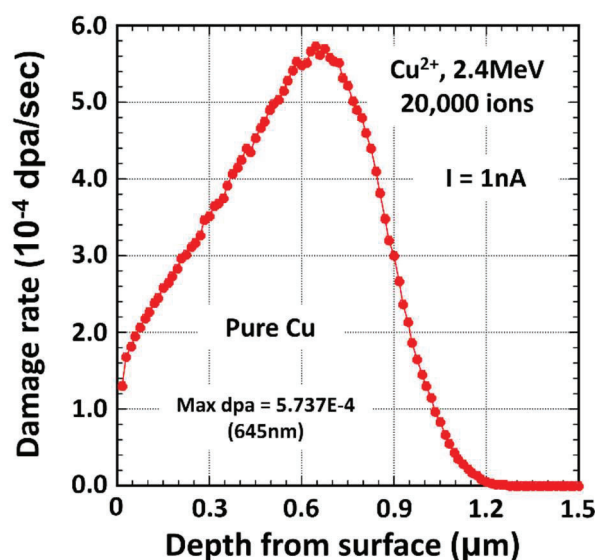


図1 TRIM 計算コードで見積もられた Cu 試料における Cu²⁺イオン照射損傷速度と試料深さの相関性

た。

3. 結果と考察

図 1 に TRIM 計算コードによって見積もられた Cu 試料表面から深さ方向に対する損傷速度を示す。Cu²⁺イオンのエネルギー及び個数をそれぞれ 2.4 MeV、20,000 個とした。また、照射面積は直径 2 mm の円とし、照射電流は 1 nA とした。Cu 試料における最大損傷速度は試料表面から 645 nm の深さで 5.74×10^{-4} dpa/sec と見積もられた。実際の Cu²⁺イオン照射実験では、損傷速度を基にして照射電流と照射時間を調整することで、目的の 3 及び 10 dpa の照射量を得ることとする。図 2 に、10 dpa 相当の室温下での Cu²⁺イオン照射した試料の典型的な STEM 像を示す。明瞭な照射による欠陥（転位ループ）とボイドが観察され、微細組織の変化が明らかとなった。現在、イオン照射量別の照射欠陥の数密度等の定量化を進めている。図 3 に未照射、3 dpa 及び 10 dpa 相当の室温下での Cu²⁺イオン照射実験後の Gridcop 試料における試料表面からの深さ方向への硬度変化を示す。試料表面から深さ方向の硬度は、Oliver-Pharr の関係に基づく荷重 (P) 押し込み深さ (h) 曲線から硬度 (H) と複合弾性率 (E_c) が求められ、硬度は (1) 式で求めた[1]。

$$H = P_{max} / A(h_c) \quad \text{--- (1)}$$

ここで、 P_{max} は最大押し込み荷重、 $A(h_c)$ は圧子と試料との接触面積を示す。3 dpa 照射後の試料における硬度はバ

ラつきが大きいものの、10 dpa 照射と同等の硬度を確認し、Cu²⁺イオン照射後の硬度は、未照射と比較して明瞭に増加し、イオン照射による硬化は 3 dpa で飽和する傾向を確認した。照射による硬度の増加は、図 2 に示したように、Cu²⁺イオン照射によって導入された転位が欠陥等で固定される“ピン止め”効果によるものと考えられる。現在、複合弾性率 (E_c) の変化を解析ながら、バラつきの多い 3 dpa 照射試料の準備を進めている。

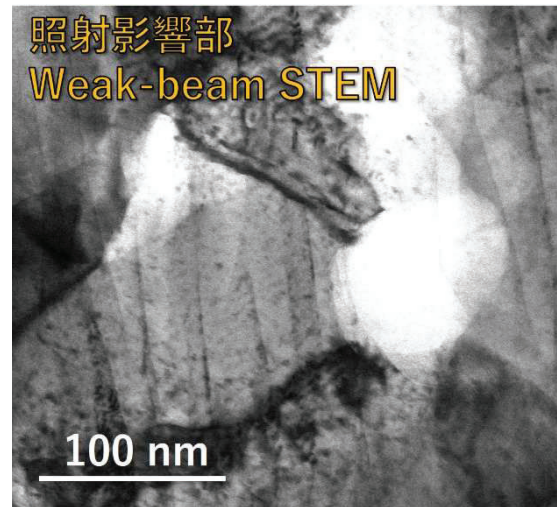


図 2 10 dpa 相当の室温下での Cu²⁺イオン照射後の Gridcop 試料の典型的な STEM 像

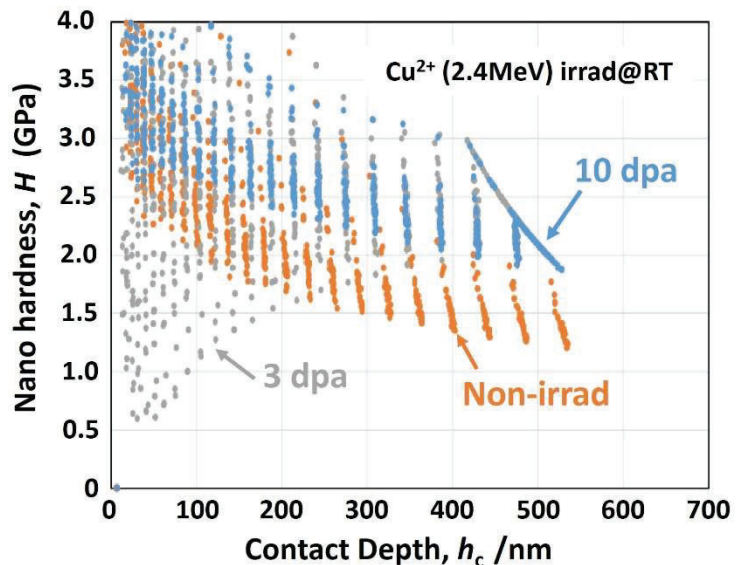


図 3 室温下での Cu²⁺イオン照射実験後の Gridcop 試料における試料表面からの深さ方向への硬度変化

[1] W. C. Oliver and G. M. Pharr, "An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments", *Journal of Materials Research*, vol. 7, (1992), pp.1564-pp.1583.

ベイズ推定を用いた位相空間トモグラフィの開発

核融合科学研究所 小林達哉

1. 研究目的

高温低衝突プラズマでは、波動-粒子相互作用により実空間と速度空間の間に張られる空間に構造が形成され、輸送や流れ場形成に影響を与える。位相空間構造の実測に向けて、速度空間計測器の高性能化[1, 2]及び解析方法の開発[3, 4]が進められている。従来の荷電交換分光計測では、スペクトルをガウシアンフィットし、さまざまな仮定・近似のもとでプラズマパラメータを推定していた。ところが、速度分布関数をガウシアンと仮定しない場合、これらの仮定や近似を用いることはできない。本研究では、荷電交換分光計測の模擬計測モデルを作成しベイズ推定フレームワーク(2DMAT/ODAT-SE)を用いた計測データモデルの逆問題解析を行った[5]。

2. 研究結果

図1に荷電交換分光計測の順問題ルーチン(プラズマパラメータを与え模擬計測データを返す)の概念図を示す。まず、速度分布関数またはイオン密度、温度、速度分布を入力パラメータとする。平衡より速度分布関数の実空間分布を得る。発光断面積とビーム分布を与え、局所発光分布を得る。視線情報と分光器での装置関数効果を考慮し、最終的に計測発光分布を得る。これらのプロセスには積分や畳み込みが含まれており、一般的にこの逆問題を解くのは困難である。

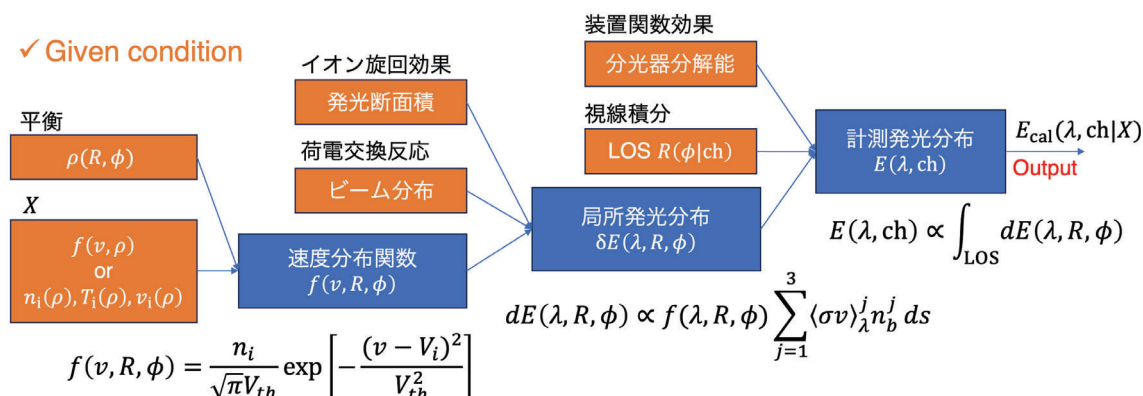


図 1. 荷電交換分光計測の順問題ルーチン

荷電交換分光計測原理の逆問題を解き、計測データからプラズマパラメータを推定することを考える。ここでは、ベイズ的手法の一種であるモンテカルロサンプリングを用いて、トライ&エラー的に逆問題解析を行った。図2に推定結果を示す。ここではデモンストレーションのため、イオン温度のみを推定パラメータとする。イオン温度を $T_i(\rho) = T_{i0}[1 - (\rho/\rho_0)^\alpha]$ として与える。ここで、LHD実験(#192384)で得られる温度分布に対応するように、 $X = [T_{i0}, \alpha] = [1.485, 2.517]$ を与え、“正解”の計測スペクトルを順問題ルーチンによって得る。次にレプリカ交換モンテカルロサンプリング法を用いてさまざまな X の値に対して順問題を解き、模擬計測スペクトルを得る。この模擬スペクトルと、実際の観測結果に対応する“正解”のスペクトルの差分の2乗平均平方根を最小化するように X を探索する。図2では、探索範囲を決めるパラメータ τ を異なる2つの値として探索を行なった結果である。このように、広域探索と局所探索を組み合わせられることがレプリカ交換モンテカルロサンプリング法の利点である。得られた最適パラメータ X には、近似による系統的誤差が入らない。また、点の分布から妥当なエラーバーも評価できる。今後は、温度分布形状や速度分布関数に関数系を仮定せずに推定する手法を開発する。また、ベイズ推定により位相空間トモグラフィ[4]などの計測器連携運転による分解能の高度化を目指す。

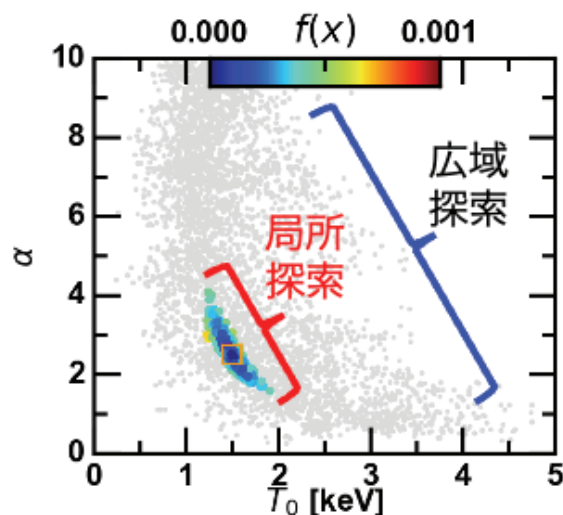


図2. LHDのイオン温度分布のパラメータ推定結果。

3. まとめ

ベイズ推定を用いた荷電交換分光計測の解析手法を開発した。まずプラズマ

パラメータから計測スペクトルを計算する、順問題ルーチンを作成した。その後、レプリカ交換モンテカルロサンプリング法を用いて逆問題を解き、計測スペクトルに対応するプラズマパラメータの推定を行なった。得られた最適パラメータには、近似による系統的誤差が入らないことが確認された。また、点の分布から妥当なエラーバーも評価できることを確認した。

研究組織

文 贊鎬（九大応力研）、西澤敬之（九大応力研）、藤澤彰英（九大応力研）

参考文献

- [1] M. Yoshinuma, et al., Plasma Fusion. Res. 19, 1402037 (2024)
- [2] K. Ida, et al., Commun. Phys. 5, 228 (2022)
- [3] T. Kobayashi et al., Phys. Plasmas 30, 052303 (2023)
- [4] T. Kobayashi et al., PNAS 121, e2408112121 (2024)
- [5] Y. Motoyama et al., CPC 280, 108465 (2022)

1 研究目的

本研究の目的は、トロイダルプラズマにおける乱流輸送を定量的に評価することである。電磁ジャイロ運動論シミュレーションを用いて、微視的なプラズマの不安定性を研究している。線形計算により、不安定性の種類を調べ、その励起条件を評価する。不安定性の飽和レベルを非線形計算から求め、乱流輸送値を求める。PLATOの予測パラメータ領域において、イオン衝突周波数がイオンのバウンス周波数よりも大きい。このとき密度勾配が増加するため、不安定性は散逸性捕捉電子モード (d-TEM) とイオン温度勾配モード (ITG) によって励起されていることを示す。d-TEMは規格化された電子プラズマ周波数が1以下となる不安定な状態である。本研究ではモデル衝突演算子を用いた局所ジャイロ運動論的シミュレーションを行う。Sugama(S)衝突演算子を用いたシミュレーションの結果とLenard-Bernstein(LB)衝突演算子によるものを比較する。輸送のモデル化をし、帯状流の輸送に対する影響を調べる。

2 パラメーター設定

TASKコードによって予測されたPLATOにおけるプラズマプロファイルを使用している。同心円状の磁束面を持つトロイダルプラズマを研究した。簡単のため、安全係数 $q(\rho) = 1 + 2\rho^2$ の分布を設定する。本研究では、局所フラックスチューブジャイロ運動論シミュレーションにGKVコードを使用した。規格化衝突周波数である ν_e^* と ν_i^* は $\rho = 0.65$ で、それぞれ0.22と8.8であることが示された。

3 シミュレーション結果

トカマクプラズマにおいて線形ジャイロ運動論的シミュレーションを行った。 S 衝突演算子と LB 衝突演算子を用いた線形シミュレーションの結果を比較した。 S 衝突演算子を用いた場合、 $\rho = 0.47$ と $\rho = 0.65$ における不安定性は、d-TEMとITGモードによって駆動されるものである。 $\rho = 0.47$ と $\rho = 0.65$ でポロイダル波数が増加すると、実周波数が電子反磁性ドリフト運動方向からイオン反磁性ドリフト運動方向へ変化することがわかった。d-TEMモードが、すべての波数領域で、 $\rho = 0.81$ で不安定になると予測される。一方、 LB 衝突演算子を用いた場合、ITGモードは安定であり、d-TEMは不安定であることが分かった。非線形ジャイロ運動論解析の結果、帯状流の乱流に対する影響は S 衝突演算子を用いた場合の方が、 LB 衝突演算子を用いた場合と比べて大きい。その結果、 S 衝突演算子を用いた場合は、 LB 衝突演算子を用いた場合と比べて、乱流輸送が小さくなることを示した。さらに乱流輸送の定量化を行った。

これまで、計算コストの削減のため、ベータ値をおおよそ0の値で解析を行っていた。計算コストを削減する必要がなくなったため、TASKで予測されるベータ値を用いて、解析を行なった。その解析結果を用い、熱粒子拡散係数のモデル化を行なっている。 j 種の熱輸送係数は、関数 $\chi_j/\chi_e^{GB} = C_{1j}\bar{T}^{a_j}/(C_{2j} + \bar{z}^{b_j}/\bar{T})$ でモデル化している。ここで、 \bar{T} は乱流ポテンシャル揺動であり、 \bar{z} は帯状流ポテンシャル揺動である。帯状流の影響は、波数が低いほど効果的であると考えられる。PLATOのd-TEM/ITGモードでは、すべての流束のスペクトルに関する解析結果で、 $k_y\rho_e = 0.005$ にピークを持つ。したがって、 b_e と b_i の値は同じような値である。一方LHDでのITGモードでは、 $b_i > b_e$ である。このとき、 Q_e のスペクトルは、 Q_i よりも大きなポロイダル波数の値でピークをとるからである。

基礎実験によるプラズマカオス制御の検討

崇城大学 情報学部 情報学科 寺坂健一郎

目的

空間的に有限なプラズマは常に不均一性を有し、この不均一性はプラズマの乱れた挙動を誘起する。このようなプラズマ中では、カオスや乱流といった乱れた挙動が観測され、これらの非線形構造の制御法の確立が求められている。とりわけ、乱れたプラズマを完全に静かな状態に抑え込むことは困難である、プラズマの乱れた状態は時々刻々と変化するという性質から、制御法には強度的に輸送の程度を調整したり、時間変化に対応して敏感に対応できるといった柔軟性が求められる。本研究では、制御性の観点からカオス状態のプラズマに着目し、プラズマの非線形的振る舞いを制御することを目的としている。本年度は、順列エントロピーを用いた解析（CH解析）を先行研究で開発したグロー放電装置の時系列データに適用した。

結果とまとめ

放電電流を制御することで揺動のパターンを変化させることのできる直流グロー放電プラズマを対象に実験・解析を行った（実験装置は昨年度までの共同研究で製作）。放電管中に励起される電離波動由来の自発光揺動を計測し、時系列データのパターンから揺動の性質を定量化できる順列エントロピーを用いたCH解析を適用した。図1は放電電流を変化させたときのCH統計量の変化を表しており、放電電流が変わるとともに変化する揺動の特徴がCH統計量の変化として評価可能であることを意味している。

また、本年度はフィードバック制御系が組み込まれたグロー放電プラズマ装置（長崎大学）の時系列データに対してもCH解析を行い、フィードバックの良悪を定量的に表す量としてCH統計量が妥当であることを示す結果を得ることが出来た。この結果を踏まえ、今後はCH統計量を基本としたプラズマの精密なフィードバック制御へ展開していく予定である。

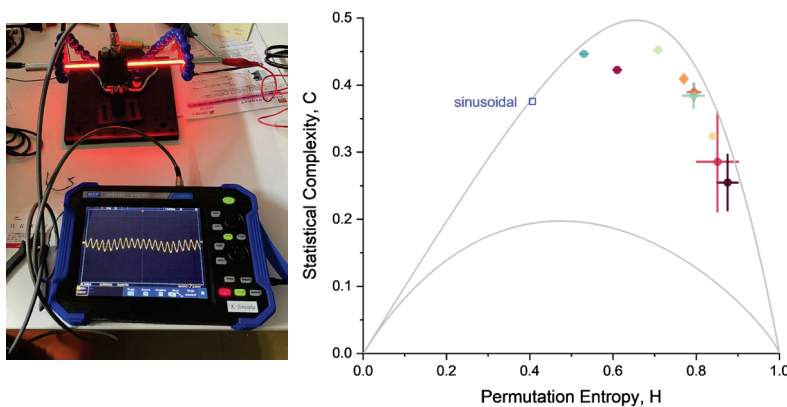


図 1. 本共同研究で製作したデスクトップサイズのプラズマカオス制御実験用直流プラズマ発生装置 (左). 放電管中に励起される電離波動の CH 解析結果 (右).

研究課題名：金属、合金および酸化物セラミックス中の水素同位体の溶解、拡散、放出挙動に関する研究
A study on dissolution, diffusion and desorption of hydrogen isotopes in metals, alloys and oxide ceramics

九州大学大学院総合理工学研究院
エネルギー科学部門 橋爪 健一

1. 目的

昨年度改良を加え、試料加熱可能とした水素グロー放電水素注入装置を用い、金属タングステン (W) 試料に重水素放電注入実験を実施した。重水素放電注入した W 試料を昇温脱離ガス分析 (Thermal Desorption Spectrometry, TDS) し、重水素が注入されていることを確認した。

2. 実験

W 円板試料 (直径 5mm、0.7 mm³) を 1000°C、30min の真空焼鈍後、放電注入装置にセットし、試料を外部ヒータで加熱しながら重水素を放電注入した。W 試料の温度は、室温、100°C、200°C とし、放電条件は、放電電圧を 1.8 kV、重水素圧力を 0.5 Torr、放電時間 100min とした。放電実験後、W 試料を TDS 装置にセットし、試料を昇温速度 0.27 °C/sec で加熱しながら質量分析計 (Anelva M-070QA-TDF) で重水素の放出挙動を測定した。

3. 結果

図 1 に昨年取得した Ta と今回実施した W からの D₂ 昇温脱離スペクトル (m/e=4 のイオン電流値) を示す。Ta のイオン電流値は対数、W は線形表示とした。Ta では各注入温度で D₂ 放出が確認され、注入温度が高くなるほど放出量が減少し、放出温度ピークが高温側にシフトする傾向があった。一方、W では、室温注入で明確な D₂ 昇温脱離ピークが見られたが、Ta に比べ放出温度は約 300°C と低く、放出量は小さかった。また、100°C 注入で室温注入の約 1/10 に減少し、200°C 注入では D₂ 放出は見られなかった。以上のように、同一注入条件でも、Ta と W で重水素の注入量、放出挙動に大きな違いが見られた。

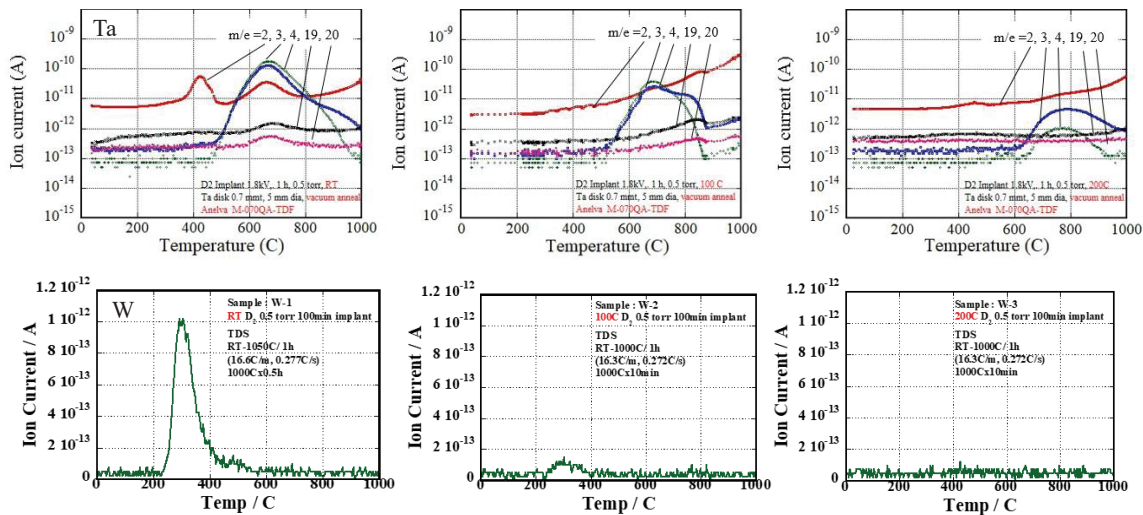


図 1 TDS 結果 (上：Ta、下：W 左：室温注入、中：100°C 注入、右：200°C 注入)

4. まとめ

W 試料を 200°C まで加熱しながらグロー放電水素注入装置を用いて D 注入を行い、TDS 法にて W 試料からの D₂ 放出実験を行った。昨年度実施した Ta 試料の結果と比較すると、D₂ 放出温度は低く、放出量も非常に小さく、W 試料と Ta 試料間の顕著な違いが見られた。

5. 研究組織

九大総理工：橋爪健一 大学院生：寺井響 九大応力研：渡邊英雄

構造材料の耐水素脆化特性に及ぼす熱処理の影響

Effect of Heat Treatment on Hydrogen Embrittlement of Structural Materials

茨城大学 車田 亮

1. 研究目的

核融合実験装置等の構造材料は、プラズマからの重水素やトリチウム等が材料内部に拡散することにより、水素脆化を引き起こす懸念がある。また、構造材料のき裂進展や破壊には、応力腐食割れ (SCC) や活性経路割れ (APC) 等がしばしば問題となり、その1つの要因として材料中の水素の影響が考えられている。一方、同組成の材料でも、その熱処理条件を変えることにより、機械的特性の向上に加えて、水素脆化を抑制できることが最近の研究で分かってきた。そこで、本研究は、構造材料の耐水素脆化特性に及ぼす熱処理条件の影響を究明し、耐水素脆化特性に優れた高性能構造材料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

2.1 7000系アルミニウム合金

試料は、T6熱処理の冷却速度の異なる3種類の7000系アルミニウム合金材料を使用した。表1に各材料の特性を示す。冷却条件の違いに伴い、空冷100°C/minで冷却したものを7H146A、空冷30°C/minで冷却したものを7H146A2、空冷20°C/minで冷却したものを7H146A3とした。それらの機械的特性は冷却速度の低下に伴って低下し、逆に破断伸びは増大した。1例として、7H146A3の引張強さは7H146Aの12.4%低下し、7H146A3の0.2%耐力は7H146Aの14.7%低下し、7H146A3の破断伸びは7H146Aの0.17%増大している。また、先行研究により、T6熱処理の条件範囲内で冷却速度が遅い方(7H146A3)が耐水素脆化特性に優れていることが明らかとなっている⁽¹⁻³⁾。

表1 7000系アルミニウム合金材料の特性

材料名	空冷の冷却条件 [°C/min]	引張強さ [MPa] (LT方向)	0.2%耐力 [MPa] (LT方向)	破断伸び [%]
7H146A	100	501	459	19.0
7H146A2	30	466	418	18.6
7H146A3	20	439	384	22.2

2.2 STEMによる7000系アルミニウム合金の微細組織観察

耐水素脆化特性の評価のためには、結晶粒界に存在する析出物の評価が重要となる。そこで、冷却速度が最も速い7H146Aと最も遅い7H146A3に対して、走査透過電子顕微鏡(STEM)を利用して結晶粒界に存在する析出物の元素や形状、サイズを解析し、耐水素脆化特性との関係性を明らかにする。STEMの観察は、高い分解能を有し、EDS分析も可能である。

3. 実験結果

STEMによる7000系アルミニウム合金の観察結果

表2に結晶粒界の析出粒子の長径と短径、粒子間距離、面積、観察面全体における析出粒子の割合を示す。長径と短径の比が7H146Aは1.63倍、7H146A3は2.12倍とともに楕円状に近い形状をしていることが確認できる。粒子間距離は7H146A3が7H146Aの3.09倍となっており、7H146A3は7H146Aと比較して粗い分布であることが確認できる。また、粒子面積に関して、7H146A3が7H146Aの2.46倍となっており、7H146A3は析出粒子がより大きく析出している。また、析出粒子の面積比率は7H146A3が7H146Aの1.09倍であり、大きな差はみられなかった。このことから、冷却速度の増減によって試料全体における粒界析出物の総量は大きく変化しないが、冷却速度が遅くなるとより大きく粗に析出し、耐水素脆化特性を向上させることが明らかとなった。

表3に示す元素分析に関して、Mg元素が主成分であった7H146Aと比較して、冷却速度の遅い7H146A3の析出粒子の主成分は、Zn元素であることが明らかとなった。また、Cu元素も7H146Aより多く析出

しており、Cu 元素は、粒界と粒内の電位差を緩和し、応力腐食割れを抑制する効果があり、耐水素脆化特性を向上させたことが明らかとなった。

表 2 析出粒子のパラメータ

	長径[nm]	短径[nm]	粒子間距[nm]	粒子面積[nm ²]	面積比率[%]
7H146A	42.64	26.24	37.20	1672.70	2.63
7H146A3	92.11	43.49	115.09	4110.84	2.88
倍率	2.16	1.66	3.09	2.46	1.09

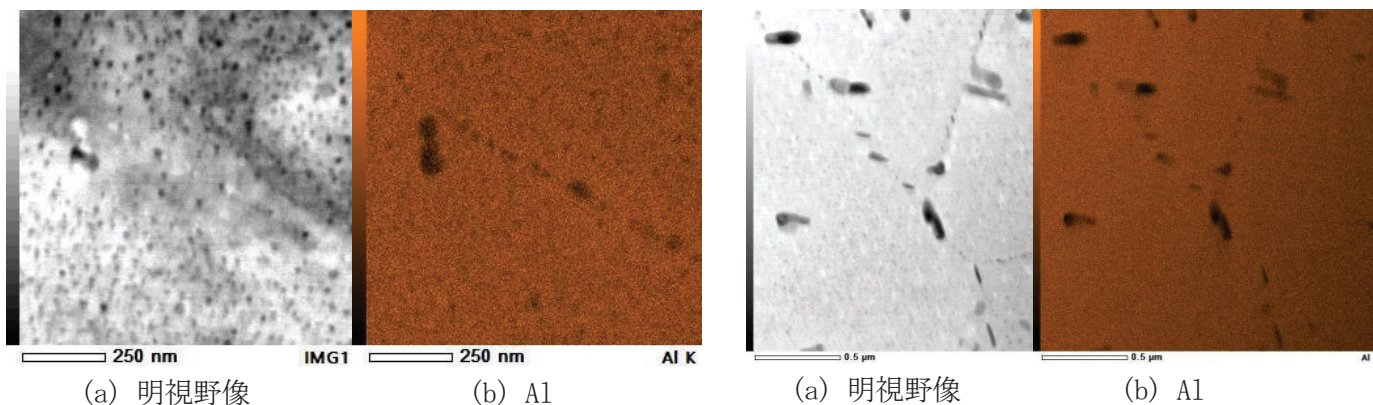


図 1 7H146A の STEM 画像

図 2 7H146A3 の STEM 画像

表 3 EDS による含有元素の含有率

元素[mass%]	Mg	Al	Si	Cr	Mn	Fe	Cu	Zn
7H146A	1.79	88.38	0.24	0.15	0.39	1.78	0.49	6.78
7H146A3	2.02	87.25	0.14	0.21	0.29	1.11	0.60	8.38

4. まとめ

本研究では、構造材料の耐水素脆化特性に及ぼす熱処理の影響を究明するために、STEM を用いた微細組織の詳細な観察を行い、粒界析出粒子の解析・評価を行った。その結果、7000 系アルミニウム合金の T6 熱処理の冷却速度を遅くすることにより、

1. 結晶粒径の微細化
2. 粒界析出物の低密及び粗大化
3. 粒界析出物における Cu 元素の析出

が明らかとなった。以上の 3 つの観点によって、耐水素脆化特性が向上したことを明らかにした。

参考文献

- (1) 大野源也、車田亮、渡邊英雄、“7000 系アルミニウム合金の破面観察による耐水素脆化特性の解明に関する研究”、日本機械学会関東支部第 30 回茨城講演会講演論文集, No. 220-2, (2022. 8. 19), OS4-(1), No. 403.
- (2) 大野源也、車田亮、田代一真、渡邊英雄、“7000 系アルミニウム合金の破面観察による耐水素脆化特性の解明に関する研究”、日本機械学会関東支部第 31 回茨城講演会講演論文集, No. 230-2, (2023. 8. 18), OS4-(1), No. 402.
- (3) 田代一真、車田亮、渡邊英雄、“7000 系アルミニウム合金の疲労特性と冷却速度の関係”、日本機械学会関東支部第 32 回茨城講演会講演論文集, No. 240-2, (2024. 8. 30), OS2-(1), No. 15.

高熱負荷によるタングステン材の損傷と強度特性の相関に関する研究

茨城大学学術研究院応用理工学野 車田 亮

【目的】国際熱核融合実験炉 (ITER) のタングステン (W) ダイバータは、定常熱負荷やディスラプションおよび ELMs 時の非定常熱負荷を受け、室温から融点直下までの静的・動的な温度変化を受ける。したがって、室温から高温までの広い温度範囲にわたり材料特性のデータを取得する必要がある。本研究では、各種の W 材に対して、ELM 様熱負荷および高熱負荷による損傷と W の降伏応力、引張強さおよび伸びなどの強度特性の相関を明らかにし、損傷を抑えるためにはどのような W の特性を向上させる必要があるかなど W 材の開発のための基礎データを取得することを目的とする。

【実験方法】ITER の W ダイバータの表面は定常負荷時に再結晶温度を超え、表面近傍は再結晶が発生することが予想されている。本年度は ITER 仕様の純 W および再結晶 W について ELM 様熱負荷による損傷と引張特性の相関に関して考察した。同じ ELM 様熱負荷 (3MeVH、150 μ s、54 μ A、5Hz、FWHM: 約 7mm、21.5h) を ITER 仕様の純 W および再結晶 W に与え、この際発生する損傷を比較した。また、ITER 仕様の純 W 圧延材 (アライドマテリアル製の応力除去処理材 (SR 材)) から引張試験片を切り出した。一部の試験片を 1800°C で 1 時間、真空焼鈍することにより再結晶処理材 (RC 材) とした。試験片の寸法は、平行部の長さ 5.0 mm、幅 1.2 mm、厚み 0.5 mm である。得られたデータから、引張強度、降伏強度、全伸びおよび均一伸びの温度依存性を求めた。

【結果】図 1 および図 2 には、ELM 様熱負荷後の純 W および再結晶 W の表面の SEM 像を示す。純 W では、結晶粒界の配向性により ND および TD 方向にき裂が形成され、そのき裂に囲まれた部分にはさらにき裂と凹凸が見られる。一方、再結晶 W では、結晶粒界に沿う円状のき裂や繰返し熱負荷による塑性変形や疲労によるすべり線や突き出しが見られる。図 3 および図 4 には、引張試験による降伏応力および全伸びの温度依存性を示す。ここで、SR は純 W、RC は再結晶 W である。降伏応力は 400°C 程度までは温度と共に加工し、延性領域 (II) では、ほぼ一定の値で、純 W は再結晶 W と比較し 4 倍程度大きい。また、全伸びは延性領域では、再結晶 W では約 50% 対して、純 W では約 10% 程度であることがわかる。強度特性としては、降伏応力が高く、また、

全伸びが高いほど損傷は抑えられると考えられるが、純 W と再結晶 W では、相異なる特性を持っていることがわかる。粒界の配向性によるき裂形成や再結晶による粒界脆性など静的な引張試験には表れない特性については、ELM 様熱負荷の結果に相関が見られない。しかし、塑性変形による表面の粗面化などに関しては相関が見られ、引張試験から得られた応力・歪曲線の温度依存性を有限要素法を用いた弾塑性解析に利用することは有用であることが示された。

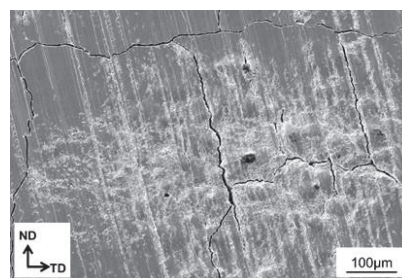


図 1 ELM 様熱負荷後の表面 (純 W)

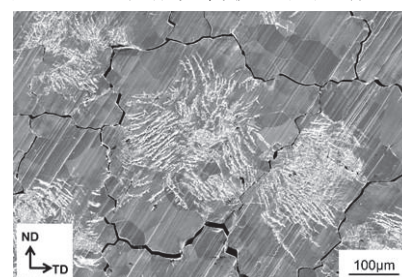


図 2 ELM 様熱負荷後の表面 (再結晶 W)

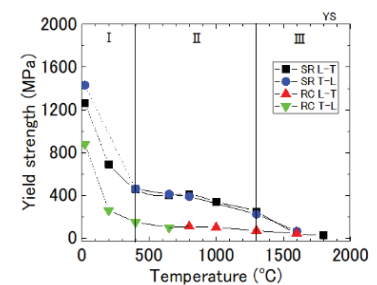


図 3 降伏応力の温度依存性

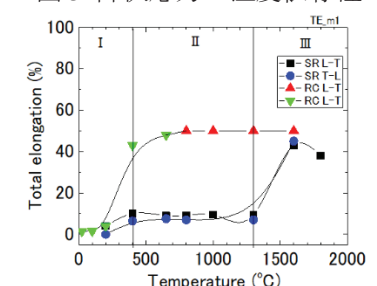


図 4 全伸びの温度依存性

PLATO トカマクへのモデル内包型平衡再構成手法の適応

京都工芸繊維大学 三瓶明希夫

研究背景、目的

限られた計測データを再現する平衡を見つけ出すのは、核融合プラズマ研究の主テーマの一つである。磁場閉じ込め核融合プラズマの平衡状態は、Grad-Shafranov 方程式と呼ばれる空間変数に関する 2 階の偏微分方程式を解くことにより求められる。ところが実際の磁気核融合プラズマに対し Grad-Shafranov 方程式を解く際、未知なパラメータも多く含まれ、また境界条件も複雑で、平衡状態を必要となる精度で求めることが非常に困難になっている。この場合、配置されたセンサーからの測定データを Grad-Shafranov 方程式を解く際に用い、プラズマの平衡状態を再構成する必要がある。

本研究では、PLATO 装置に生成されるトカマクプラズマを対象として、申請者が開発しているモデル内包型の平衡再構成手法[A. Sanpei, IEEE Access (2023)]を適用し、限定的な計測結果から内部構造を同定することを目的とする。本手法によって平衡についての研究を進めることで、最適磁場配位の探索、プラズマ位置・形状制御に対する最適な制御等が可能になると期待され、加えて、閉じ込め特性・揺動・不安定性の研究に寄与することが期待できる。

研究成果

今年度はトカマクの平衡再構成に必要な磁気計測システムが PLATO 装置においてまだ開発段階であり、実際の実験データを取得することができなかった。よって当初の研究計画を変更し、トカマクの平衡再構成に用いる計測システムの最適化に応用可能な新たな平衡再構成手法の開発に取り組んだ。

磁気プローブ等のセンサーを多く配置するにはコストがかかる一方、計測データが不足すると Grad-Shafranov 方程式(力学的平衡条件)を満たし、かつ計測データを誤差の範囲で矛盾なく再現する解が複数存在する状態が生じてしまう。このような場合はモデル内包型の平衡再構成手法を用いてもプラズマ内部構造を正確に評価することは難しい。本研究ではベイズ統計を用いて任意のトカマクと計測システムが与えられた状態において解空間の分布を直接計算することで、力学的平衡状態が 1 つに定まる条件で計測が行われているか否かを判断する手法の開発に取り組んだ。トモグラフィ計測においてはガウス過程回帰(GPR)を用いることでこのような解析が可能であることが知られている。平衡再構成においてもトロイダル電流要素の線形結合により順モデルを構築できる磁気計測データに関しては GPR の適用が可能である。よって、まず GPR を用いてこれら計測を再現する解空間を求めた。その後以下の式のような条件付き確率を導入した。

$$p(\mathcal{I}_{GS} | \mathbf{j}_p, dP/d\psi, dF^2/d\psi) \propto \exp \left(- \sum_{n \in \mathbf{x}_p} \frac{\left(j_{p,n} - 2\pi R_n \frac{dP_n}{d\psi} - \frac{\pi}{\mu_0 R_n} \frac{dF_n^2}{d\psi} \right)^2}{2\sigma_{j_{GS,n}}^2} \right) \cdot \dots \quad (1)$$

この式は力学的平衡条件がポロイダル断面全てにおいて成り立つとき確率が大きくなる。GPRより得られた解を記述する確率分布関数に式(1)を掛け、マルコフ連鎖モンテカルロ法により数値的に Grad-Shafranov 方程式と磁気計測の両方を満たす解空間を求める解析コードを開発した。

開発したコードを用いて PLATO トカマクの平衡再構成における解空間の分布を計算した。この計算においては図 1 (a)の磁気計測システムを仮想的に配置した。赤道面におけるプラズマ電流の解空間を図 1 (b)に示す。この結果から図 1 (a)の磁気センサーの配置ではプラズマ中心部の電流分布が一意に決まらないことが分かる。一方、磁気面に関しては解空間の広がり小さく 1cm 程度の精度で磁気面の位置が決定できることが分かった。磁気センサーの配置を変えながらこのような解析を繰り返すことで平衡再構成用の計測システムの最適化が可能となる。

本研究内容は既に論文にまとめ、2024 年 11 月に国際誌 “Plasma Physics and Controlled Fusion” に掲載された。

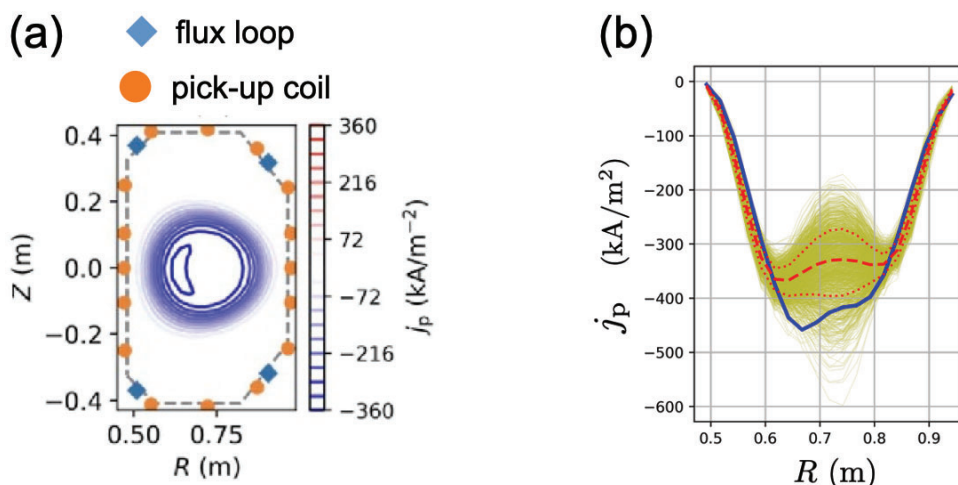


図 1 仮想的に配置したフラックスループとピックアップコイル(a)と赤道面における解空間のプラズマ電流分布。(b)における青線は入力として与えた真の電流分布。赤色の波線と点線はそれぞれ 50%と 1σ に対応する累積確率を表す。

本研究に関する学会発表と論文

- [1] 西澤敬之, 徳田悟, 三瓶明希夫, 長谷川真, 山崎広太郎, 藤澤彰英 “統計を用いた Grad-Shafranov 方程式の解空間の探索” 第 41 回 プラズマ・核融合学会 年会
- [2] T. Nishizawa, S. Tokuda, A. Sanpei, M. Hasegawa, K. Yamasaki, A. Fujisawa, "Equilibrium reconstruction of axisymmetric plasmas by combining Gaussian process regression and Markov chain Monte Carlo sampling", Plasma Physics and Controlled Fusion **67** (2025) 015006

宇宙・実験室プラズマにおける乱流描像の普遍性・特殊性

Description of turbulence in space and laboratory plasma: Universality and particularity

富山大学・学術研究部・教育学系 成行 泰裕

研究目的：

多様な波動が伝搬する媒質であるプラズマでは、乱流状態も多様性に富んでいる。一方で、一見して異なる乱流状態に共通する普遍的な構造の探求は、興味深い課題である。宇宙プラズマ乱流の中でも、太陽風プラズマ中の乱流は人工衛星による「その場」観測により、多くの性質が知られている。一方で、実験室プラズマにおいても乱流研究は中心課題の一つであり、重要な知見が多く得られている。本研究課題では、理論モデル・乱流統計などを接点として、宇宙・実験室プラズマにおける乱流描像の普遍性・特殊性の検討を行う。目標とするのは、実験室プラズマ研究の進展と宇宙プラズマ研究の進展を連動させるスキームを構築することである。

研究方法：

本研究の推進に当たっては、それぞれの研究グループが理論解析・数値計算・実験/データ解析について発展させた結果について、定期的に議論を行うことを基本としている。

研究成果：

プラズマ中の乱流の励起や大スケール流れの影響を簡便に記述するために、ランダム振動子[e.g., Kraichnan, 1964]によるモデル化が行われてきた[e.g., Krommes, 2009; Narita, 2017; Bourouaine+Perez, 2019]。各波数モードの成長・減衰は形式的に成長率(減衰率)と波数モードの複素振幅の積で表すことができるが、ここでは元になる系から求められた表式[e.g., Krommes+Kim, 2000]を議論するのではなく、確率モデルを用いた成長率の記述を考えた。具体的には、確率的波動成長理論[e.g., Robinson, 1995; 2006]の拡張について議論した。

確率的波動成長理論では成長率を確率過程で表すが、最も簡単な Ornstein-Uhlenbeck 過程の過減衰近似を用いたモデルでは、各モードのエネルギーの対数がガウス型の分布になる[e.g., Robinson, 1995; 2006; Cairns et al, 1998]。本研究ではまず、エネルギーの対数が非ガウスの分布に従うような確率モデルを検討し、非ガウスの分布をもたらす項がフーリエモードの発展方程式中に非線形項として現れることを確認した。

次に、磁場(電流)に対する確率的な外部駆動の数値モデルとして用いられている Langevin アンテナ[TenBarge et al, 2014]について、確率的波動成長理論のような乗算ノイズを含む場合への拡張を議論した。Langevin アンテナは実部・虚部それぞれに対して独立な加法ノイズをランダム力として与えているが、このような場合は極表示の変数(フーリエ振幅

(複素振幅の絶対値)とフーリエ位相)間のノイズに相関が生じ、フーリエ位相のランダム力にフーリエ振幅依存性が現れる[e.g., Gardiner, 2009]。ここでは、これらの Langevin アンテナの性質を整理し、乗算ノイズを含む形に拡張したモデルを示した。このモデルは、加法ノイズが無い場合は確率的波動成長理論に、乗算ノイズが無い場合は Langevin アンテナにそれぞれ対応している。

加えて、プラズマ乱流に関係して生じる突發現象に対する計数過程の適用についても議論を行った。このトピックについては、共同研究から関係者の範囲を拡大して実験室・磁気圏プラズマ中の突發現象についての小研究会(closed meeting)の形で議論を継続した。次年度以降は、新たな分野融合の研究集会の形で乱流描像の普遍性・特殊性の議論を深めることを計画している。

公表状況(学会発表) :

なし

研究組織 :

成行泰裕 (富山大)、佐々木真 (日大)、加藤雄人(東北大)、川面洋平(宇都宮大)、諫山翔伍 (九大)、羽田亨 (九大)、稲垣滋(京大)、小菅佑輔(九大)

基礎プラズマ装置 PANTA における高波数乱流励起実験

名古屋大学大学院工学研究科 河内裕一

要旨

本課題では、直線磁化プラズマ装置 PANTA において磁場制御を活用し、イオンのラーマー半径よりも小さいスケールの高波数乱流励起実験を行った。今年度は、特にパラメータスキャンや追加の解析に力を入れ、高波数乱流の質量依存性や非線形結合の特徴を明らかにした。そして、イオンバーンスタイン波と類似の特徴を持つ新たなモードを発見した。今後は、新規プローブの導入等を通じて、背景の流れや輸送との関係について調査を進める。

研究目的

磁化プラズマ中に発生する乱流は核融合炉における閉じ込め性能を決定づけるものとして研究が進められてきた。これまでのプラズマ乱流研究は、イオン実効ラーマー半径 ρ_s 程度以上の空間スケールを持つ乱流、すなわちイオンスケールの乱流を対象に実験が行われてきた。近年、イオン実効ラーマー半径 ρ_s よりもさらに細かいスケール、すなわち $k_{\perp}\rho_s \geq 1$ の高波数乱流が電子の熱輸送や異常加熱と関連するとされて注目されている。高波数乱流の観測は主に一部の大型トーラス装置にてマイクロ波散乱計測で行われてきたが、一昨年度の九州大学での共同研究にて、高波数乱流を直線装置で励起させることに成功した[1]。本研究の目的は、昨年度に続きパラメータスキャンを引き続き行い、モデルの構築に向けた高波数乱流の特徴づけとした。

実験方法

九州大学応用力学研究所の乱流プラズマ実験装置(PANTA)を用いて高波数乱流実験を行った。典型的な放電磁場 900G に対して、より小さい磁場 225G を印加することにより高波数乱流が励起することが確認されている[1, 2](図 1 参照)。これまで、中性粒子ガス圧の依存性に調査しており、質量依存性について調査を行った。その後、放電に利用する希ガスを Ne, Ar, Kr, Xe と変えながら実験を行った。ガスを変更する際は、分光器を用いてスペクトル構造から放電で発光しているイオンを同定した。

高波数乱流の計測には空間分解能の高井周方向 64ch プローブを利用し、時間分解能の高いイオン飽和電流を計測した。得られたデータから、高波数乱流の時空間ダイナミクスをスペクトル解析によって特徴づけた。

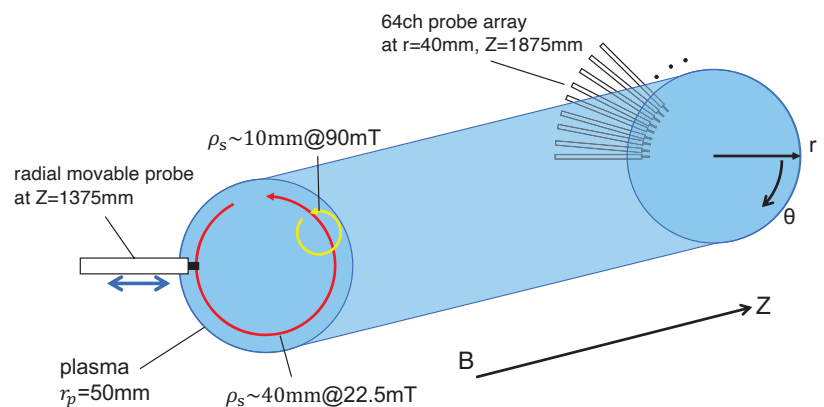


図 1: 高波数乱流励起実験の概要[2]

実験結果および考察

本研究で行った質量スキャンの結果を図2に示す。いずれのイオン質量においてもイオンサイクロトロン周波数よりも大きく、イオンラーマー半径よりも小さい構造を持つという高波数乱流の特徴が観測できた。ブロードなスペクトルと離散的なスペクトルがいずれのイオンでも確認できた。また、乱流スペクトルの分布の傾きは質量が重いほど急になっていることがわかる。これは、乱流の位相速度は質量が重いほど遅いということを意味しており、イオン音速や反磁性ドリフト速度の傾向と概ね一致することがわかった。また、離散スペクトルのピーク間周波数はいずれのイオンを利用した場合においても、イオンサイクロトロン周波数程度であることがわかった。このことから、離散ピークを持つ揺動はサイクロトロン運動に起因する不安定性により励起すると考えられる。

離散ピークの起源として、静電イオンサイクロトロン波のようなイオンサイクロトロン周波数を基本波に持つ揺動の非線形結合による高調波の生成、またはイオンバーンスタイン波の線形不安定による励起が考えられる。これらの区別のために、非線形結合強度をバイコヒーレンスにより評価した(図3)。この結果から、離散ピークはイオンバーンスタイン波の線形不安定による励起であることが示唆された。今後は、ブロードな揺動および離散ピークについて、モデルの構築等を行う。

成果報告

本研究の成果は、査読有科学雑誌 Physics of Plasmas [3](DOI: 10.1063/5.0187997)および Plasma and Fusion Research [4](DOI: 10.1585/pfr.1201031)に掲載された。また、日本物理学会秋季大会、プラズマ核融合学会年会、および AAPPS-DPP にて、本研究についての口頭発表を行った。

参考文献

- [1] Y. Kawachi et al., Sci. Rep. 12, 19799 (2022)
- [2] Y. Kawachi et al., PPCF 65, 28, 115001 (2023)
- [3] Y. Kawachi et al., PoP 31, 044502(2024)
- [4] Y. Kawachi et al., PFR 19, 1201031 (2024)

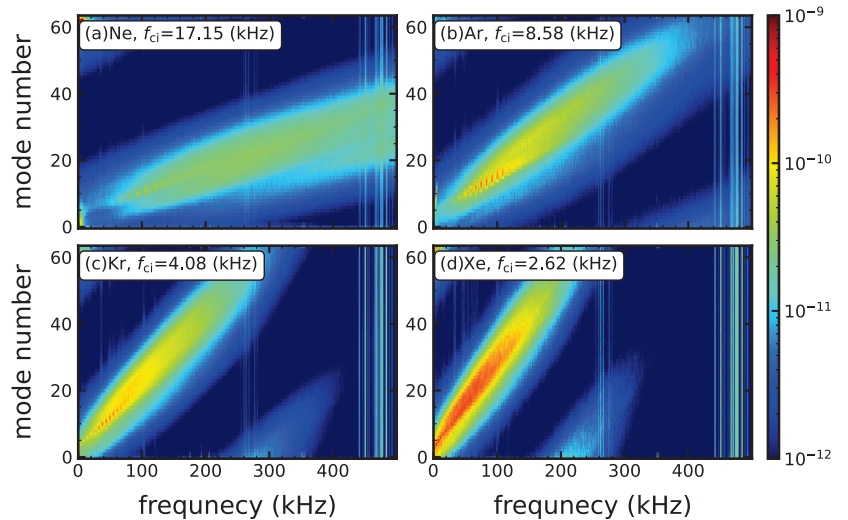


図2：高波数乱流発生時の二次元スペクトルの質量依存性。

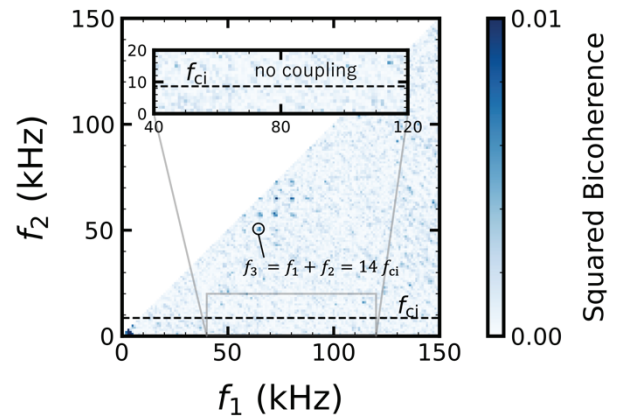


図3：高波数乱流励起実験で得られたバイコヒーレンス

プラズマ乱流の非線形発展に関する研究

量子科学技術研究開発機構 那珂研究所 西村征也

【研究目的】

天体近傍の宇宙空間や磁場閉じ込め装置においては、高温プラズマが背景磁場に磁化された状態にある。このような磁化プラズマにおいては、磁気流体力学的（MHD）不安定性が発生する。

地球磁気圏におけるプラズマは地磁気を介して電離圏プラズマと結合している。電離圏におけるプラズマの揺らぎが磁気圏におけるアルフベン波を励起し、このアルフベン波が電離圏におけるプラズマの揺らぎを増幅する現象をフィードバック不安定性と呼ぶ。フィードバック不安定性はオーロラのカーテン状や渦巻き状の自発的な構造形成を説明するための理論である。

フィードバック不安定性における磁気圏モデルに対しては、インピーダンスモデル、MHD モデル、二流体モデル、ジャイロ運動論的モデル、ジャイロ流体モデルが使用されてきた。特に、ジャイロ運動論的モデルとジャイロ流体モデルは、磁気圏におけるアルフベン波を運動論的アルフベン波として表現するために導入されたものであり、有限イオンラマ半径効果や電子ランダウ減衰などの運動論的効果がフィードバック不安定性の線形安定性や非線形発展に大きな影響を与えることが明らかにされている。

これまでの共同研究においては、地磁気を真っ直ぐな磁力線であると近似した磁気圏モデルに対して、ジャイロ運動論モデルを適用したフィードバック不安定性の安定性解析を実施した。本研究においては、地磁気をより現実的な双極子磁場であると近似した場合に解析を拡張することを目的とした。

【研究方法】

今年度の研究においては、地磁気に沿った、磁場、密度、温度の非一様性を加味できるように、磁気圏の平衡のモデルを拡張した。図1に双極子磁場に沿った計算空間メッシュと地磁気に沿ったアルフベン速度と電子熱速度の分布を示す。このような非一様な平衡に対してジャイロ運動論モデルを解いた。北緯 70° の位置の電離圏における $100\text{km} \times 100\text{km}$ の領域と、それに対応する磁気圏の領域に対してシミュレーションを実施し、電離圏におけるプラズマ流体の揺動と磁気圏におけるプラズマの速度分布関数揺動の時間発展を調べた。

次に、シミュレーション結果に対する解析を行なった。シミュレーションにおいては、地磁気が一様であると仮定された場合と比べて、非常に大きな電子の自由エネルギーが生成されることが観察された。そこで、エネルギー保存則に基づいた解析を行い、磁気圏の非一様性がどのような物理過程を介して、大きな自由エネルギーを生成しているかを分析した。

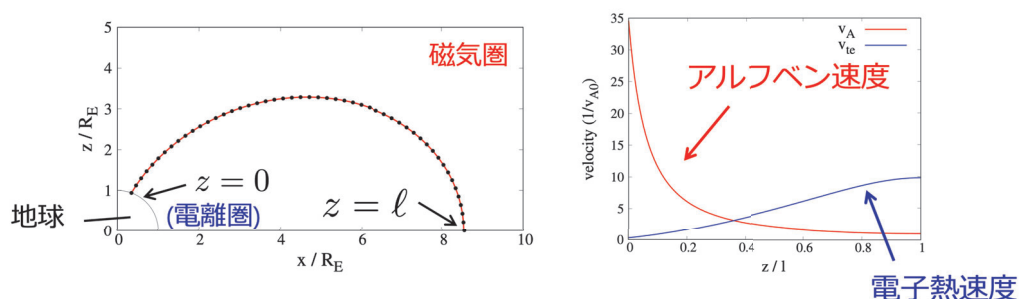


図1 地磁気に沿った計算メッシュ（左図）、アルフベン速度と電子熱速度の分布（右図）

【研究結果】

図 2 に、磁気圏における地磁気に沿った密度揺動の分布、エネルギーとエネルギーソースの時間発展を示す。地磁気に沿って基本波に近い緩やかな空間分布を持った揺動が発達することが観察される。エネルギーの時間発展においては、アルフベン波を構成する電磁揺動エネルギーよりも、電子の自由エネルギーが一桁程度大きな値を取ることが観察される。このような大きな自由エネルギーの生成は、一様な地磁気を仮定した解析では観察されない。エネルギーソースの時間発展においては、フィードバック不安定性を駆動する電気的工作(電離圏における背景電場が駆動)よりも、熱力学的の仕事が大きな割合を占めていることが観察された。

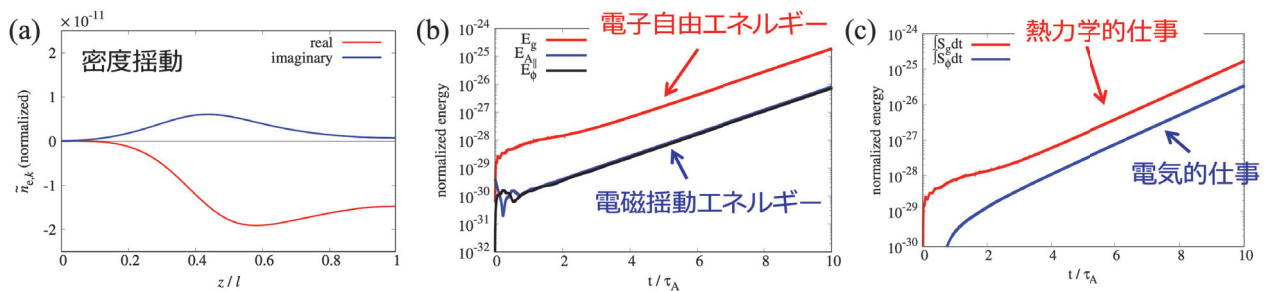


図 2 (a) 磁気圏の密度揺動分布、(b) エネルギーの時間発展、(c) エネルギーソースの時間発展

図 3 に、図 2 で観察された電子自由エネルギーおよび熱力学的仕事の生成機構をまとめる。磁気圏-電離圏結合においては、電離圏における背景電場が電気的パワーを励起し、磁気圏に運動論的アルフベン波を生じる。運動論的アルフベン波は、ランダウ減衰に代表される速度空間における微細構造を持つ。この速度空間の微細構造が地磁気に沿った平衡の非一様性と結合することによって、熱力学的パワーが生じる。この熱力学的パワーが大きな電子の自由エネルギーが生成する。

最後に、電子の自由エネルギーの物理的な意味について補足する。密度場、速度場、圧力場などの流体量は、速度分布関数の速度空間の積分量に相当する。本研究においては、速度分布関数を流体量に分解するエルミート展開の手法を導入した。その結果、高次の流体量の揺動が比較的大きな振幅で存在することが明らかになった。以上から、大きな電子自由エネルギーの生成は、運動論的效果および平衡の非一様性によって、非常に階層性の高い流体揺動場が形成されたと解釈することができる。

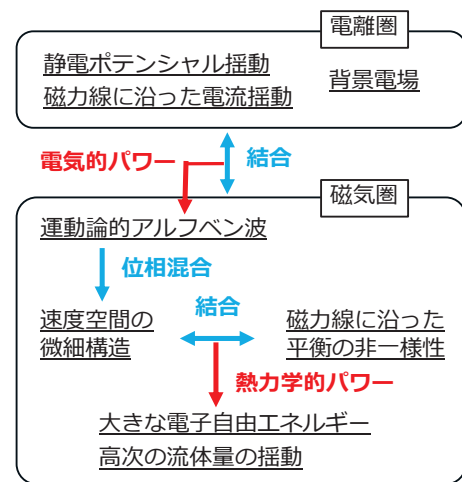


図 3 自由エネルギー生成機構

【まとめ】

磁気圏の非一様性を加味した場合について、ジャイロ運動論モデルを用いたフィードバック不安定性の線形安定性解析を行ない、フィードバック不安定性の発達とともに、非一様性に起因する電子の自由エネルギーが生成されることが新たに明らかになった。このような現象が、オーロラの構造形成や電子加速機構とどのように関わっているかを明らかにすることが今後の課題である。

高エネルギー重イオン照射を利用した量子ナノ構造作製のための基盤的研究

量子科学技術研究開発機構 高崎量子技術基盤研究所 圓谷 志郎

1. 目的

量子ドットをはじめとした量子ナノ構造は、情報通信やエネルギー分野等、幅広い分野での応用が期待されており、量子ナノ構造のサイズ・形状・組成・結晶性を精密に制御できる新しい作製法の開発が課題となっている。本研究では、イオンビームにより局所構造を制御したグラフェン[1,2]をナノ構造の生成核に用いることによって、ナノ構造のサイズ・形状・組成・結晶性等の精密制御を試みる。

本報告書では、イオンビーム照射により形成したグラフェンの局所構造を放射光分光手法等により明らかにした研究成果について報告する。

2. 実験方法

KCl/グラフェン/SiO₂ ヘテロ構造に高エネルギーイオン(2.4 MeV Cu²⁺, 3.0 MeV Ni⁺)を照射することでグラフェンへの塩素のドーピングを行った。イオン照射は九州大学応用物理学研究所および高崎量子技術基盤研究所のタンデム加速器を用いた。イオンビーム照射によってグラフェンに作製した局所構造は X 線吸収分光(XAFS)や第一原理計算等により評価した。

3. 結果および考察

図 1(a)-(c)に 10¹⁵ ions/cm² イオンビーム照射によって Cl をドーピングしたグラフェンの広域 X 線吸収微細構造(EXAFS)スペクトルを示す。理論計算で得られた曲線と実験結果が比較的一致していることから、図 1(d)の構造が妥当であることが示唆された。X 線吸収端近傍構造(XANES), XPS の結果もあわせて考えると、イオン照射に伴いグラフェンの炭素の結合が sp² C=C から sp³ C-C へと変化し塩素がドーピングされたことが分かった。

本研究では、高エネルギーイオン照射下の非平衡励起反応場を利用することで、大面積で層数が厳密に制御された塩化グラフェンを創出することができた。本技術を発展させることで従来手法では実現困難な二次元層状物質のドーピング状態および電子状態の幅広い制御に加えて、直進性の高いイオンビームの特徴を活かしてグラフェンの微小領域に位置選択的なドーピングが可能になることも考えられる。これにより、ナノエレクトロニクスやスピントロニクスの技術に新たな進歩をもたらすことが期待される。

参考文献

[1] S. Entani, *et al.*, RSC. Adv. **6**, 68525 (2016). [2] S. Entani, *et al.*, Nanotech. **31**, 125705 (2020).

成果報告

- 1) 圓谷志郎, 本田充紀, 水口将輝, 渡邊英雄, 大島武, 好田誠, 「高エネルギーイオン照射法によるグラフェンへの異種原子ドーピング」, 第 85 回応用物理学会秋季学術講演会, 2024 年 9 月.
- 2) Shiro Entani, Tomitsugu Taguchi, Makoto Kohda, Shunya Yamamoto, “Atomic and electronic structure of ion-irradiated silicon carbides”, The 7th QST International Symposium -Quantum Technologies towards Harmonious Future-, 2024 年月.
- 3) Shiro Entani, Tomitsugu Taguchi, Makoto Kohda, Shunya Yamamoto, “XAFS study of the atomic structure of ion-irradiated silicon carbide”, Photon Factory Activity Report 2023, accepted.

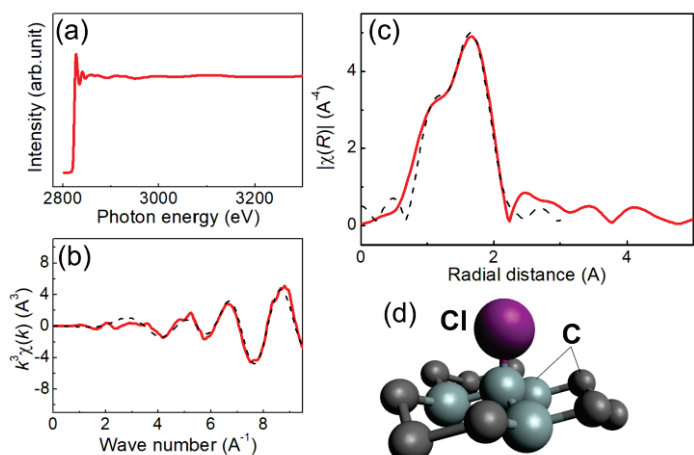


図 1 イオン照射により塩素をドーピングしたグラフェンの(a)Cl K 端 EXAFS スペクトル, (b)EXAFS 振動スペクトル, (c)塩素原子周りの動径分布関数。(c)EXAFS 解析および第一原理計算により求めた塩素ドーピンググラフェンの原子構造。

高温高压水と金属界面における物質移動現象の把握

九州大学大学院総合理工学研究院 片山一成

【緒言】

高温高压水は、原子力発電システムの熱媒体として広く利用されている。原子炉内では、ウランの三体核分裂等により水素の放射性同位体であるトリチウムが生成される。水素同位体は移動性が高いため、燃料被覆管を透過して一次冷却水に移行し、最終的には、復水器を通じて環境中に移行する。原子力発電所からのトリチウム放出量はモニタリングされており、規制値よりも十分に低いレベルで排出されている。しかしながら、福島第一原子力発電所からの処理水の海洋放出が国際問題となったこともあり、近年トリチウムに対する社会の関心は高く、より安全性に留意したトリチウムの管理・制御が望まれる。そのためには、トリチウムの基礎移動現象を理解し、トリチウム移行を抑制する対策を検討する必要がある。トリチウム挙動に関する研究は、これまでも多く行われているが、高温高压水と金属界面での移行は、腐食等の化学反応を含む複雑な物質移動が関与するため十分には解明されていない。本研究では、熱交換器材料として広く利用されているインコネル管を介した高温高压水間でのトリチウム移行速度を調べた。

【実験方法】

九州大学アイソトープ総合センター伊都地区実験室内に、二重管式透過実験装置を作製し、約 300°C、約 17MPa の高温高压水間でのインコネル管に対するトリチウム透過実験を実施した。図 1 に実験装置概略図を示す。ステンレス鋼管 (SS316 : 外径 1/2 インチ、長さ 300mm、厚み 1mm) に片封じのインコネル管 (Inconel600 相当合金管 : 外径 1/4 インチ、長さ 400mm、厚み 0.5mm) を挿入する構造で、インコネル管内 (透過 1 次側) に 33kBq/cc のトリチウム水を充填し、インコネル管とステンレス鋼管の間 (透過 2 次側) に軽水を充填して、ヘリウムで加圧した。密閉状態で、約 300°C まで加熱することで約 17MPa まで昇圧し保持した。下部の 2 つのバルブを開・閉することで、軽水の一部を採取した。加熱後、不定期に軽水の一部を採取し、液体シンチレーションカウンターを用いてトリチウム濃度を測定した。1 回の採取で得られた軽水を 1cc ずつ 3 回抽出し測定した。

【結果及び考察】

図 2 に透過 2 次側軽水中のトリチウム濃度の時間変化を示す。加熱 5 日後には濃度上昇が観測され、緩やかに上昇速度が低下した。濃度上昇速度を透過有効面積で割ることで得られる透過流束は、 $10^{-15} \sim 10^{-16} \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ と求まった。この値は、先行研究[1]において約 5 倍のトリチウム濃度 (166kBq/cc) で行われた同様な実験での値と同程度であった。つまり、2 次側へのトリチウム透過流束に対する 1 次側トリチウム濃度の影響は見られなかった。トリチウムの透過は、インコネル表面でのニッケルと水との反応に伴うトリチウムガスの発生に起因すると考えている。同じ温度・圧力条件であればトリチウム濃度に比例してトリチウムガス発生量が増加し、トリチウム透過流束も増加すると予想される。発生したトリチウムガスは、1 次側に存在する僅かな気相部分に移行・滞留すると考えられるが、この気相体積の違いによって、透過に寄与するトリチウム分圧に違いが生じるのではないかと考えている。つまり、本実験体系では、トリチウム濃度だけではなく、透過 1 次側気相体積がトリチウム透過流束に寄与しているのではないかと推測される。

参考文献

[1] K. Katayama et al., *Journal of Nuclear Materials*, 565 (2022) 153723.

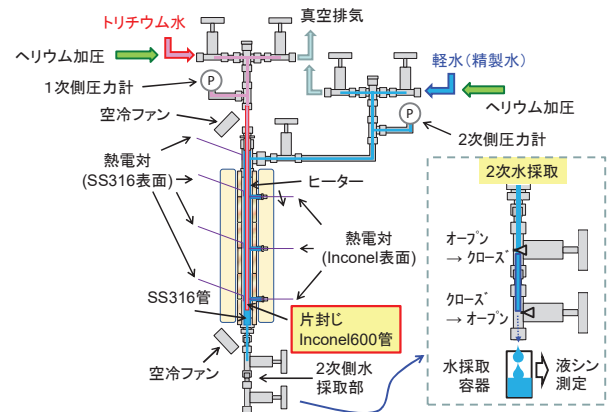


図 1 二重管式透過実験装置概略図

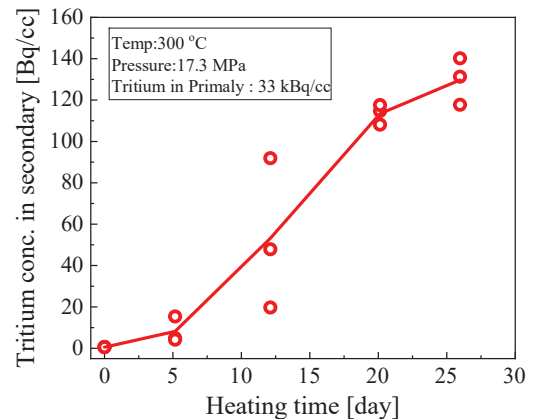


図 2 透過二次側のトリチウム濃度変化

定常プラズマ対向機器への適用を目指した
粉末固相接合によるタングステン-銅接合材の研究

核融合科学研究所 森崎友宏

1. 研究の目的

九大・応力研の球状トカマク装置 QUEST は、運転開始時より真空容器壁から炭素材を完全に排除し、全金属壁という将来を見据えた条件下で実験を行い今日に至っている。QUEST はまた、高温壁による能動的な粒子制御実験が可能であり、粒子循環プロセスの理解と制御法の開発という、定常プラズマ維持に不可欠な知見の獲得に貢献してきた。QUEST の真空容器壁は、タングステン部とステンレス部から成る。近年タングステンの比率が高まってはいるものの、その大部分はステンレス板にタングステン粒子を溶射したコーティング材 (APS タングステン) であるため表面には多くの細孔が存在し、粒子循環に大きな影響を与えられている。このためバルク材への交換が順次行われている。バルクタングステンを導入するに当たり本研究では、タングステン板とステンレスを核融合研で開発した「放電プラズマ焼結 (SPS)」で接合し、壁材として用いることを提案している。

2. 試験片の製作

昨年度、厚さ 1mm のタングステン板と 5mm のステンレス板の接合を試みたところ、タングステン側が凸となる大きな反りが生じ、最終的に応力開放に伴う剥離が、接合面に発生した。このため本年度は、昨年と同じ大きさの素材 (タングステン: 1mm×50mm×50mm、ステンレス: 5mm×50mm×50mm) を用いつつも、応力緩和のために接合面に挟み込むインサート (中間層) を、従来のニッケル単層インサートから、タングステン・銅混合粉末、銅箔、純銅粉末の3層構造インサートに変更した試験片を製作し SPS 接合を試みた。

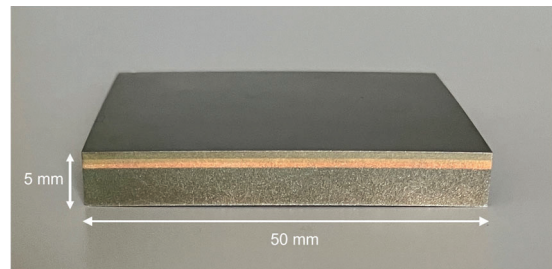


図1 接合試験片。上からタングステン (1mm)、多層中間層 (1mm)、ステンレス (5mm)。上に凸の反りが認められる。

3. 結果

上述の試験片を、900°C、20MPa (上下1次元)、水素雰囲気中で 30 分間 SPS 接合した。直後の目視および光学顕微鏡による観察で、接合に剥離等の欠陥は見られなかったが、図1に示すように僅かな反りは認められた。多層インサートの採用は、熱応力緩和という点で大きな効果が得られることが分かった。初期的な SEM 観察 (図2) によると、インサート部では、銅がタングステン粒子の間に良好に流れ込んでいることが分かった。

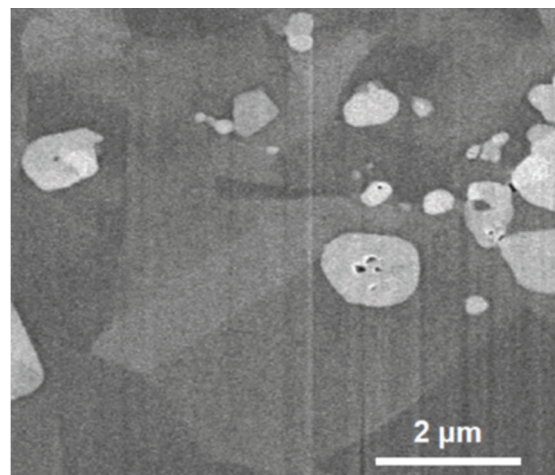


図2 インサート (タングステン・銅混合粉末) 部の SEM イメージ。白玉がタングステン。

4. 研究組織

核融合研: 森崎友宏 (代表者)、村瀬尊則、時谷政行
九州大学: 花田和明 (世話人)、島袋瞬、吉田直亮

中性子照射原子力材料の高分解能 STEM-EDS 実現のための手法開発

東北大学 吉田健太

1. 目的

原子力材料は高温かつ中性子照射下の過酷環境に曝されることで、材料内部に特異な微細組織を形成することが知られている。本課題では、特に結晶粒界や転位と照射欠陥の相互作用を理解するため、エネルギー分散型 X 線分光法 (EDS) 計測時の球面収差補正走査透過電子顕微鏡法 (STEM) のレンズ条件および撮影手順を最適化し、より高い分解能で微細組織のひずみと化学組成を同時評価する顕微手法を確立することを目的としている。2022 年度は、九大での実験条件を想定した軽水炉压力容器鋼の WB-STEM/STEM-EDS 分析を実施した。また東北大内においてコールド材試料 (銅合金) とホルダーの通常輸送を行ったうえで加熱高分解能 (HR) STEM を実施し、各種運搬についても問題なく可能であることを確認した。2023 年度は、コロナ禍のため未実施の次世代炉容器材 (低放射化フェライト: 例えば F82H 鋼) および核融合炉用銅合金に 2022 年度に確立した WB-STEM/HRSTEM/STEM-EDS 分析を適用した。それにより、原子炉压力容器鋼中の転位周辺の溶質元素偏析および銅合金中の加熱に伴う母相/析出物界面の組成変化について確認を行った。2024 年度は WB-STEM/STEM-EDS 分析を照射欠陥集合体の動的観察に応用することを目的とする。

2. 実験方法

本研究課題は、大洗センターで FIB マイクロサンプリングにより作製した試料について、予め WB-STEM 観察および $g \cdot b$ 解析を行うことで EDS 計測に最適となる領域および試料傾斜条件の探索を行った。2024 年度は Re-W(1100°C 中性子照射材) および軽水炉压力容器鋼 (中性子照射材、450°C 焼鈍後) 九大応力研に L 型輸送し、WB-STEM/STEM-EDS 分析を実施した。

軽水炉压力容器鋼試料には、中部電力浜岡原子力発電所 1 号機 UT (超音波探傷試験) ブロックを用いた。大電流アルゴンイオンビーム加工 (ArBlade5000, Hitachi High-Tech) および電子線後方散乱回折ひずみ分析 (EBSD-KAM Map) によりシャルピー衝撃試験破面に形成した亀裂先端の応力集中部を特定し、その周囲 50 μ m 程度の領域から、膜厚 200nm の薄膜試料を集束イオンビーム加工 (Ga-FIB-Helios, Thermo Fisher Scientific) でマイクロサンプリングした。その場観察には、傾斜追尾型 WB-STEM (ARM 200F, JEOL) を収束半角 6.2mrad のナノプローブモードで用いた。放射化試料対応の二軸傾斜試料ホルダーおよびヒーターコントロールユニット (EM08170HCU, JEOL) を用いた。転位の動的な挙動を動画で記録、独自開発したスキャン像用の画像補正 (MPPM 補正) 法を用いて解析した。

3. 実験結果および考察

粒界析出物に起因する転位ネットワークの形成および熱緩和過程を明らかにした。図表上に示される EBSD ひずみ解析はシャルピー破面の不均一なひずみ分布を示しており、亀裂先端では KAM 値 2.7° に達していることがわかる。WB-STEM 観察の結果、亀裂先端には転位密度 $2.5 \times 10^{16}/\text{m}^2$ を超える塑性変形が富 Mn 析出物近傍に形成していることを確認した (図 1 左下)。その場 WB-STEM 試験により、室温から 600°C まで空間分解能 0.4nm/pixel、時間分解能 1s/frame で熱緩和過程を調査したところ、焼鈍温度 500°C から 550°C において、富 Mn 析出物を繋ぐ新たな亜粒界形成を発見した (図 1 右下)。従来、理論計算では予見されていた界面に生じる塑性変形の不連続を幾何学的に埋め合わせるための GN 転位 (Geometrically Necessary dislocation) をナノ

スケールで動的に可視化した成果といえる。

以上の結果は *Materialia* 誌に共同論文として発表した。また日本原子力学会材料部会において学術写真賞を受賞した。

本研究で確認した破面上亀裂を破壊面の1例として、炭化物や酸化物など硬質第二相粒子界面やマイクロボイド/空隙表面など、不均一なひずみ分布を持った微細組織は数多く知られている。本研究で開発したその場 WB-STEM 観察によって、これらのメソスコピック領域の微細組織が材料試験に及ぼす影響に関する新たな知見が獲得されることが期待できる。

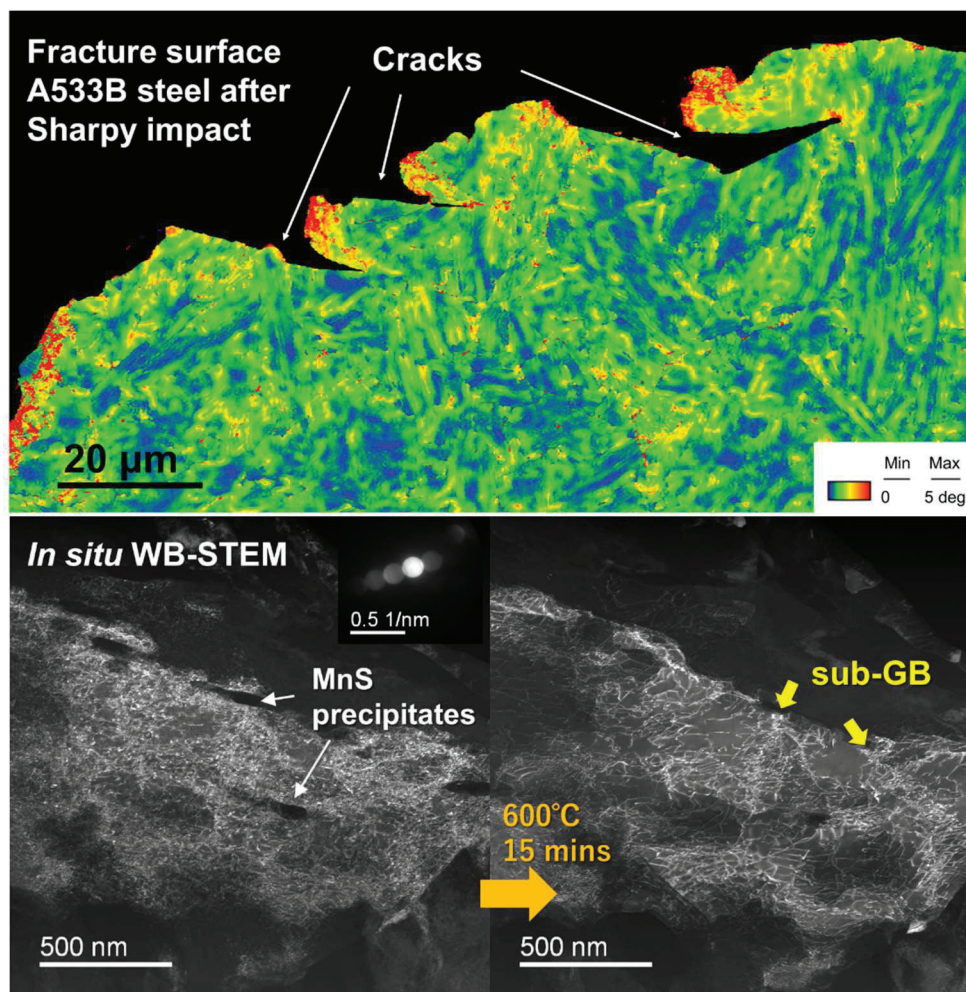


図1 圧力容器 UT Block の断面ひずみ観察およびその場 WB-STEM 観察

MAX 相セラミックスの照射損傷に及ぼす結晶方位の影響

北海道大学 大学院工学研究院 池田 賢一

【目的】 MAX相セラミックスは、 $M_{n+1}AX_n$ ($n=1\sim 3$) の一般式で示される三元化合物の総称である。ここで、MはTi、Cr、Zr、Nbなどの遷移金属元素、AはSi、Al、GeなどのAグループ元素、XはCもしくはNである。MAX相セラミックスは六方晶系の結晶構造を有し、結晶を構成する $M_{n+1}X_n$ 層とA層がc軸方向に積層するような層状構造を持つため、強い異方性を示すことが知られている。 $M_{n+1}X_n$ 層とA層がそれぞれ共有結合と金属結合を有することに起因して、セラミックスの性質と金属の性質を兼ね備えた特異な物質としても注目されている。いくつかのMAX相セラミックスでは室温環境での耐照射損傷性に優れているとの報告もあり、核融合炉材等の適用にも期待されているが、その結晶方位依存性など基礎的なデータが不足している状況である。研究代表者らは、これまでMAX相セラミックスの一種である Ti_3SiC_2 を対象に磁場中スリップキャストというコロイドプロセスを用いた手法により成形体を作製し、放電プラズマ焼結により結晶配向した焼結体の作製に成功している。本年度は、照射実験に用いるための配向焼結体ならびに試験片の作製を行った。また、応用力学研究所の重イオン照射装置を今後使用していくことを考え、核融合炉用ダイバータ材としての利用が期待されている酸化物分散強化銅合金とタングステンの接合体(ODS-Cu/W接合体)への銅イオン照射実験を行った。

【実験方法】 本研究では、市販の Ti_3SiC_2 (以降、TSCと表記) 粉末(KANTHAL社製MAXTHAL(312))を用いた。TSC粉末、ポリエチレンイミン、エタノールを混合したスラリーを作製し、スラリーを流し込む型と多孔質アルミナモールドを共に超伝導マグネット内に設置し、回転させながら12Tの磁場をモールド水平方向から印可することでスリップキャストを行った。この成形体から放電プラズマ焼結装置(SPS)を用いて焼結体を作製し、磁場印可方向と垂直方向にTSCのc軸が配向していることを、XRDを用いて確認した。また、ODS-Cu/Wの接合体は、ODS-CuとしてGlidcop AL-15を選択し、W板を金属ろう(BNi-6)材で接合したものを対象とした。 Cu^{2+} イオンを室温環境でODS-Cuの照射量が0.3~10dpaになるように照射し、力学特性をナノインデンテーション試験により評価した。

【結果および今後の展望】 作製したTSCの配向焼結体をXRDによって配向度を確認した結果、スリップキャスト方向に底面(0001)が配向していることを確認できた。ビッカース硬さ試験機による配向方向による硬さの違いについて、様々な荷重で評価した結果、どの荷重においても底面が配向している面が最も高いことがわかった。また、底面と 90° および 45° の角度の面についても評価した結果、 45° の面が最も低いことがわかった。ODS-Cu/W接合体の照射実験を行った結果、図に示すように照射量が多いほど、試料表面から深さ方向への硬化量が高くなることが明らかになった。今後は接合体だけでなく、TSCの照射損傷に及ぼす結晶方位の影響等を検討する予定である。

【研究組織】

所内世話人: 渡邊英雄 研究協力者: 嶋田雄介(九州大学・准教授)、羽立周磨(北海道大学・学生)

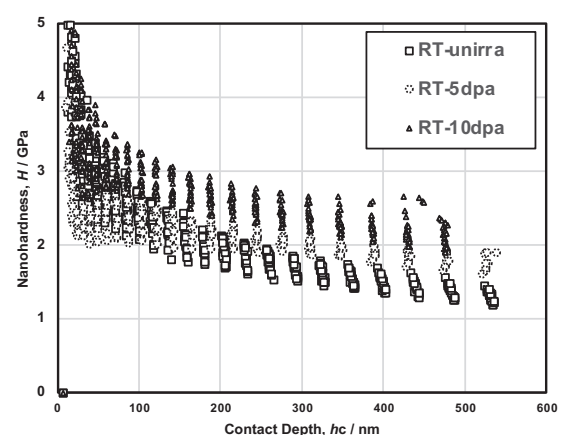


図 試料表面からの深さに対するナノ硬さの照射量依存性

磁化プラズマ中における磁力線平行・垂直方向イオン温度計測技術の開発

東北大学大学院工学研究科 高橋宏幸

1. 目的

磁力線長の短い直線プラズマ装置や衝突率の低い SOL・ダイバータ領域では磁力線平行方向のイオン温度(T_{\parallel})と垂直方向のイオン温度(T_{\perp})の値は異なると考えられ、そのため T_{\parallel} と T_{\perp} それぞれの計測が必要である。本研究は Retarding field analyzer (RFA) を用いて 2 方向のイオン温度を一度に導き出す手法を開発する事を目指すもので、本年度は小型直線装置でも利用可能なコンパクトな RFA を製作し、イオン温度の計測に対するイオン流れの影響を明らかにするための実験を行った。

2. 成果

図 1(a) に示すように直径と奥行きがそれぞれ 6 mm と 5 mm 程度の小型の RFA を製作した。この RFA を用いて DT-ALPHA (東北大学) で生成したヘリウムプラズマの径方向計測を行った。図 1(b) に示すように、DT-ALPHA では $E \times B$ ドリフトにより円周方向のイオン流れが生じる。このようなプラズマに対して RFA を y 軸方向に移動させてイオン温度を計測したところ図 1(c) に示す結果を得た。ここで、上段のパネルは RFA よりも 15 cm 上流側に設置された静電プローブで得た電子温度および電子密度の径方向分布である。中段パネルに示すのは $E \times B$ ドリフトを仮定し n_e と T_e の分布から求めた周方向回転速度である。RFA のイオンコレクタが $+x$ 方向を向くとき (下段パネルの青)、 $y > 0$ mm の領域で RFA は回転流と正対する。反対に $y < 0$ mm ではイオンコレクタは回転流の下流側を計測する。図に示すように、コレクタが回転流と正対する場合には相対的に高いイオン温度が得られ、そうでない場合には低いイオン温度が得られた。この傾向はコレクタの向きを 180 度変化させた場合 (下段パネルの赤) でも確認できる。更に、回転流の存在しない $y = 0$ mm ではコレクタの向きに関わらず同程度のイオン温度が得られる。シンプルな解析ではあるがイオン流れによる Shifted-Maxwellian により実験結果を説明できる事も分かっている。

3. 成果報告

- ① 加賀谷重考 他, 「Retarding field analyzer を用いたイオン温度計測に対するイオン流の影響の検証」, 日本物理学会第 79 回年次大会, 講演番号 16aB201-4
- ② 加賀谷重考 他, 「Retarding Field Analyzer によるイオン温度計測に対するイオン流の影響についての実験および 0 次元モデル検証」, 第 41 回プラズマ・核融合学会年会, 講演番号 20P12

4. 研究組織

東北大学大学院工学研究科 高橋宏幸, 加賀谷重考

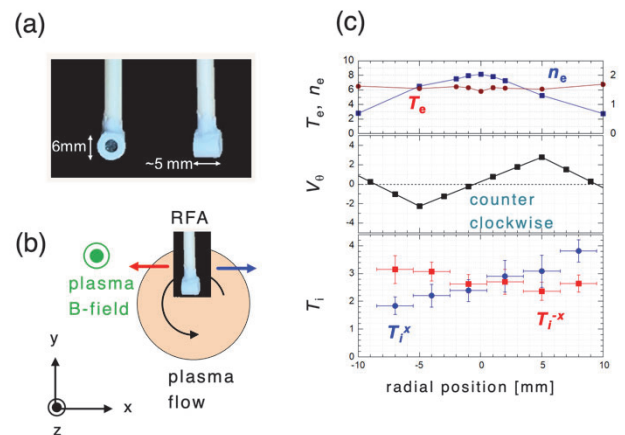


図 1. (a)製作した RFA, (b)イオン計測体系, および(c)計測結果.

QUEST プラズマに曝露した金属材料における水素の昇温脱離特性

九州大学大学院 総合理工学研究院 大宅諒

目的

プラズマ境界力学実験装置 QUEST (Q-shu University Experiment with Steady-State Spherical Tokamak) において、高温壁を用いた長時間放電が実施されており、長時間放電の維持のためには粒子バランスの保持が課題である。そこでは様々なプラズマ-壁相互作用が生起しており、特に壁材料における水素の吸蔵・放出現象が重要であり、その把握が求められている。

本研究では、壁材料における水素の吸蔵・放出のプロセスの解明とその制御を目的として、QUEST でプラズマに曝露した金属試料において、吸蔵された水素の昇温脱離特性を調べる。

実験方法

金属試料の表面状態は、水素の吸蔵・放出特性に大きな影響を与える。そこで、本年度は、QUEST で水素プラズマに曝露した金属試料について、表面分析を実施した。

過去のキャンペーン (2018S/S) にて、上部壁・赤道壁・下部壁に設置し、プラズマに曝露させた金属試料 (ステンレス SUS316, タングステン) を用いた。表面分析には、QUEST 実験棟に設置された走査型電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscope) を用いて、試料の表面形態を調べた。また、SEM に併設されたエネルギー分散型 X 線分析 (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) により、試料表面の元素分析を行った。

実験結果と考察

試料表面の元素分析の結果を、表 1 に示す。As-received 試料 (プラズマ曝露していない試料) と比べて、上部壁や赤道壁に設置した試料では、炭素や酸素などの不純物が確認された。特に、赤道壁においては顕著であり、表面に堆積層が形成されている可能性がある。また、下部壁に設置したタングステン試料は、As-received 試料と同様の元素割合であり、不純物は確認されなかった。そのため、ここでは、堆積層が形成されている可能性は低いと考えられる。

このような表面状態は、水素の吸蔵・放出プロセスに大きな影響を与える。次年度以降に昇温脱離実験 (Thermal Desorption Spectrometry) を実施する予定であるが、その結果を解釈するために重要な知見を得ることができた。

表1 各金属試料における元素分析結果

材料	試料名・設置場所	元素の割合
SUS316L	As-received	Fe 67.0% Cr 18.6% Ni 11.2%
	2018S/S 上部壁	Fe 63.4% Cr 15.5% Ni 10.7% C 7.4%
	2018S/S 赤道壁	Fe 59.2% Cr 14.5% Ni 9.9% C 8.7% O 4.8%
	2018S/S 下部壁	Fe 63.1% Cr 15.6% Ni 10.7% C 7.7%
タングステン	As-received	W 94.4% O 6.3%
	2018S/S 上部壁	W 87.4% O 10.2%
	2018S/S 赤道壁	W 70.5% O 11.7% C 16.5% Fe 1.25%
	2018S/S 下部壁	W 94.6% O 5.4%

高度形状制御を目的としたトカマクの垂直位置制御用フィードバックシステムの開発

日本大学 加藤修平

研究背景、目的

プラズマのポロイダル断面を円形から変化させる形状制御はトカマクプラズマの高性能化の上で重要な手段となっている。形状制御より得られるトカマクのポロイダル断面を表す指標として三角度、楕円度がある。楕円度が上昇するとエネルギー閉じ込め性能が長くなることは広くして知られている。三角度に関しては ELM の制御に重要な役割を果たす可能性が指摘されている。また近年では負の三角度を持つプラズマを生成することでトカマク炉において長年の問題となってきた温度分布の硬直性を打ち破る良好な閉じ込めが得られることが報告されている。形状制御によりトカマクの高性能化が生じる機構の解明することは九州大学応用力学研究所が保有する PLATO 装置において最重要研究課題の一つとなっている。

形状制御を行う上で問題となるのが上下方向の安定性である。通常プラズマのポロイダル断面を円形から大きく変化させようとするプラズマが上下に移動し失われやすくなる。本研究では上下方向に対するプラズマ位置のフィードバックシステムを開発し、PLATO 装置において高い楕円度、三角度を持つプラズマを生成することを目指す。

本年度の成果

本研究では当初 PLATO 装置において既に実験に利用されている垂直磁場用コンデンサバンクを活用する計画であった。しかし 2024 年 6 月に CS コイル用コンデンサバンクにおいて地絡事故が発生した。垂直磁場用コンデンサバンクも CS コイル用コンデンサバンクと似た構造を持つため安全上の懸念から両コンデンサバンクともに大幅な改修を行った。このため本研究の開始が 11 月まで遅延することになった。

限られた研究期間の中で図 1 に示すようにハーフブリッジ構成の IGBT モジュール(Infineon 社製、型式 FF900R17ME7_B11、定格電圧 1.7 kV、定格電流 0.9 kA)を 2 つ組み合わせてフルブリッジインバータを作成した。IGBT モジュールの間には FPGA (Renesas 製 AP-RX62G-0A) を配置してあり、高分解能 PWM により PI 制御を用いて PLATO の FP コイルに任意の電流波形を生成することを想定している。FPGA のプログラムにおけるフィードバック系の制御器は最大 20 kHz のサンプリング周期とし、PWM 分解能は約

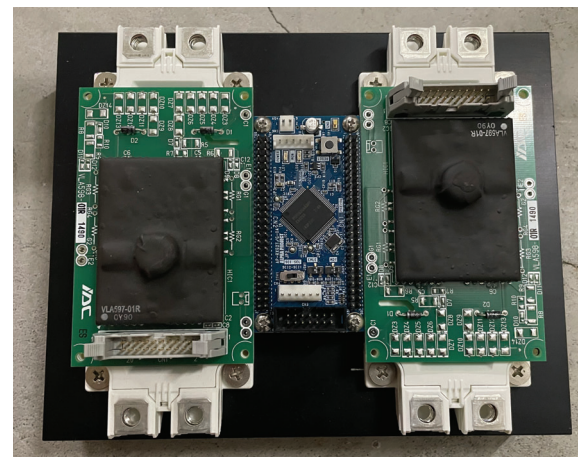


図 1 本研究で製作したフルブリッジインバータ。定格電圧 1.7kV、定格電流 0.9kA。

100 ns、比例ゲインと積分時間を独立に設定可能で、アンチwindアップ構成としている。さらに本フィードバック系の目標値（指令値）の入力方法は時系列プレマッピングデータ（最大1000点）またはアナログ電圧信号（最大5V, 12bit）の両方に対応している。一方、本フィードバック系における制御量はコイル電流信号のみならずアナログ電圧信号（最大5V, 12bit）であれば別な信号でも対応可能な構成としている。また、高電圧 IGBT モジュールのスイッチングに起因するアナログ電圧信号ノイズを除去すべく、すべてのアナログ電圧信号に対してAD変換後にデジタル一次ローパスフィルタを通した構成としている。

また本研究に加え、所内世話人の西澤敬之助教の行っている PLATO 装置におけるトカマク立ち上げに用いる電源開発をサポートしてきた。電力用半導体素子や電流計の選定を行い、安全性を確保しつつ電源の開発コストを抑えることに貢献した。研究成果に示す学会発表と論文に共著者として貢献した。

来年度の計画

来年度は図2に示す垂直磁場用コンデンサバンクの上段部に新たにコンデンサを配置し、今年度開発したフルブリッジインバータを接続してコイル電流の制御実験を行う。しかし来年度は所内世話人の西澤敬之助教が長期海外研修のため PLATO 装置にて迅速に作業を進めることが困難になることが予想される。状況に応じて研究協力者の名古屋大学河内祐一助教の協力を仰ぎ、名古屋大学のSOLEIL 装置にて電流制御実験を行うことを検討している。

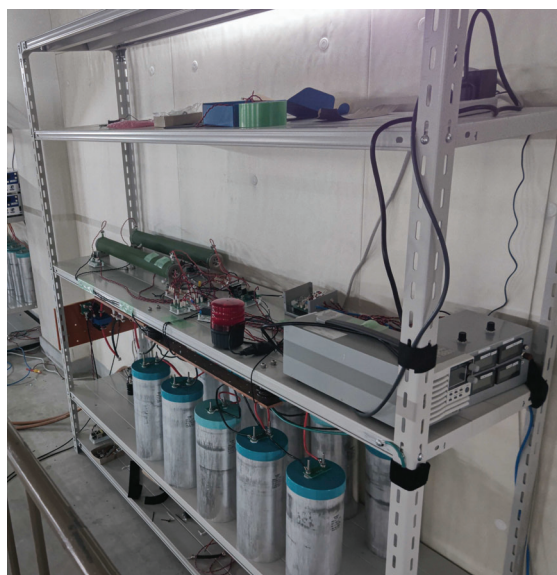


図2 PLATO 装置の垂直磁場用コンデンサバンク

本年度の研究成果

- [1] 西澤敬之,...加藤修平(14/21),..., 藤澤彰英 "PLATO トカマクの初期プラズマ" 第41回 プラズマ・核融合学会 年会
- [2] T. Nishizawa,..., S. Kato(14/21),.. A.Fujisawa "Initial plasma achieved within engineering constraints in the PLATO tokamak" submitted to Fusion Engineering and Design

ヘリウムイオン照射した鉄系合金のキャビティ形成と磁気特性

岩手大学理工学部 鎌田康寛

目的：核融合炉や先進原子炉用の機器構造物の候補材料として Fe-Cr 合金があり、機械特性に与える照射影響の研究が進んでいる。核融合炉ブランケットでは、プラズマ消失時に発生する電磁力の計算で磁気特性値の入力が必要となるが、磁性に与える照射影響の理解は進んでいない。ここで、核融合炉の過酷照射環境での損傷組織（はじき出し損傷やキャビティ形成）を模擬する手法として、イオン照射が有用である。しかし、損傷域が試料表層に限定されるため、損傷域のみの物性を分離して調べるのが難しい。解決策として、我々は高品位薄膜試料を作製し、イオン照射で薄膜全体を損傷させて磁気計測する研究手法を提案している。今回、膜厚の異なる Fe-Cr エピタキシャル薄膜試料を He⁺ 照射し、磁気ヒステリシス曲線の形状を比較し、照射効果の起源について詳しく検討した。

方法：基板に MgO(001)単結晶を用いて、超高真空中で電子ビーム蒸着を実施し、膜厚 200 nm の Fe および Fe-10%Cr 及び、膜厚 50, 100, 150, 200 nm の Fe-20%Cr 薄膜を作製した。その後、加速電圧 30keV の He⁺を室温で、最大照射量は 3×10^{21} He/m² で照射した。SRIM 計算より、最大損傷量は深さ 100 nm で 19 dpa で、膜厚 200 nm の薄膜内にヘリウムが残留する照射条件であることを確認した。照射前後の構造を EBSD、TEM で、磁化曲線を VSM で調べた。

結果及び考察：膜厚 200 nm の Fe, 10%Cr, 20%Cr 薄膜の断面 TEM 観察の結果、すべての試料で高密度のキャビティの形成を確認した。他方、Fe では照射前後で磁化曲線に変化は見られないが、10%Cr と 20%Cr では磁化曲線が傾き磁化困難になった。このことから、キャビティの形成自体は磁性に影響を及ぼさないが、形成に伴う Cr の原子分布の変化が関係していることが推察される。ここで磁化曲線が 2 成分（磁化困難成分と容易成分）の和からなるモデルを考え、解析を進めた。その結果、10%Cr および 20%Cr 薄膜では、磁化困難成分の体積分率が 6 割に及ぶことがわかった。次に膜厚を変えた Fe-20%Cr 薄膜を調べた。膜厚 200 nm 薄膜と同様に、150 nm 試料の磁化曲線は磁化困難な挙動が顕著に見られたが、50 nm 薄膜では見られなかった（なお、100 nm 薄膜は剥離し、測定できなかった）。2 成分モデルを適用し、それぞれの体積分率を求め、さらに 2 成分が薄膜内で 2 層に分かれて存在すると仮定し、それぞれの膜厚を求めた。その結果、膜厚が厚い試料では磁化容易成分の膜厚が一定（66 nm）と見積もられた。200 nm 薄膜の断面 TEM 観察結果から、照射後の薄膜の下部側でキャビティの形成が顕著であったことから、表面側の薄膜上部に磁化容易成分、基板側の薄膜下部に磁化困難成分の領域が形成し、Cr 偏析を伴ったキャビティが後者の磁化困難な挙動を引き起こしたと推察される。

成果報告：

Y. Kamada *et al.*, “Magnetic Hardening of Heavily Helium-Ion-Irradiated Iron-Chromium Alloys”, *Metals*, 14 (2024) 568 (12 pages). <https://doi.org/10.3390/met14050568>

Y. Kamada *et al.*, “Helium ion irradiation effects on microstructure and magnetism of BCC iron-based alloys”, IBMM2024, Jul 01-05, 2024, London, UK

梅山大輝ら、日本金属学会秋期講演大会(第 175 回) 概要集(2024)

組織：鎌田康寛, 村上武, 梅山大輝, 石田響揮, 吉田萩 : 岩手大、渡辺英雄 : 九大

種々の熱入射法による材料表面の高エネルギー密度入射損耗解析法の開発

応用ながれ研究所とレーザー技術総合研究所 糟谷紘一

1. はじめに 過酷な条件下で使用する材料の諸特性を明らかにし、それらを生かした諸応用を提案し、これらの課題に関連する、最近の共同研究結果について、その概要を述べる。

2. 研究目的 九州大学応用力学研究所の材料加熱装置を用いて諸材料を加熱し、各種計測装置により、高温下での表面損耗量等を測定する。これらの結果を生かして、極限状態材料の損耗破壊監視計測法の確立を目指すことが、本共同研究の最終目標である。本研究では、近く再開する高熱流照射のために、継続中の関連計測装置の整備と新規な方法の調査・提案をした。

3. 研究成果

3-1 多種レーザー変位計の検討と新規調達

以前の材料損耗研究、損耗開始閾値の詳細測定には、かなり少量の損耗量・絶対値を測定するために、K社の変位計の使用が便利で役に立ち、現在プラズマ対向壁・核融合材料第1候補となっているタングステンの高エネルギー密度入射による損耗閾値の我々のグループの先行成果が、世界的にも注目された。現在もこの種の研究は、さらに、より有望なタングステン合金について、検討中で、近く、A社との共同研究を開始予定である。

但し、より変位計遠距離設置の可能性と、より絶対値の大きな損耗量測定のために、或いは変位計と被測定材料との間に、例えば窓板などの隔壁が入ってくる場合の測定のために、K社以外の変位計の併用を計画した。そこで、O社の変位計が、最近の研究・開発の結果として、新製品が出ていることが判明したので、これらを発注し、まもなく入荷予定である。

3-2 制御と計測用PC機器の整備

長年使ってきた同上機器のOSは、多くがMS Windows XPであり、近年のPC基本OSに比べて旧式であり、特に2025年10月予定のWin10サポート終了後は、セキュリティ確保上から、新OSで稼働するPC機器への切り替えが必須である。そこで、我々もとりあえず、1系統のみ切り替えのために、ポータブルPCを発注し、現在、検収後の使用待ちである。これと前項のO社変位計が揃う来週には、新変位計による損耗量測定と、大型核融合装置プラズマ対向壁の損耗対策安全モニターの研究に進むことができる。

3-3 新しい提案（単純変位計測からOCT計測へ）

単層並びに多層複合材料へOCT（光コヒーレントトモグラフィ）計測法を適用できれば、より高精度かつ厳しい環境下の材料測定ができる。但し、例えばタングステンなどの可視域不透明材料の場合には、光源自体の開発と随伴干渉計測法の開発が必要であるが、将来的に有望となる可能性が大きい。

4. 謝辞 本研究は、九州大学応用力学研究所と東京科学大学（旧・東京工業大学）・フロンティア材料研究所の共同研究経費の援助を受けた。また、前者の糟谷直宏教授を含む共同研究支援職員と後者の共同研究支援職員、並びに、応用ながれ研究所スタッフの支援を受けた。併せて感謝の意を表します。

5. 研究組織

糟谷紘一^{A,B}, 井澤靖和^B, 徳永和俊^C, 川路 均^D, 平等拓範^{B,F}, 野上修平^G,

^A 応用ながれ研究所, ^B レーザー技術総合研究所, ^C 九州大学応用力学研究所,

^D 東京科学大学（旧・東京工業大学）・フロンティア材料研究所, ^E 分子科学研究所,

^F 理化学研究所, ^G アライドマテリアル. (2025/02/14/記)

3次元波数スペクトル計測と温度・密度・流速分布計測を用いた磁化プラズマ乱流の競合状態の解明

広島大学 先進理工系科学研究科 山崎 広太郎

本研究では直線磁化プラズマ装置 PANTA においてトモグラフィを用いて揺動の波数情報や温度密度分布の情報から異なる声質を持つ磁化プラズマ乱流の競合状態の観測を行った。シミュレーション研究から磁化プラズマ中では種類の異なる乱流が径方向位置の異なる場所で同時に生じ得ることが明らかになった(M. Sasaki, PoP (2017))。この結果は、磁化プラズマ中心から周辺部までに生じる輸送を明らかにするためには各径方向位置で生じている揺動の種類を明らかにし、それらの揺動が示す競合を明らかにする必要があることを示唆している。本研究ではトモグラフィを用いて得られた揺動データから周波数および周方向モード数で分類した揺動の空間構造の時間発展を詳細に解析することで、挙動の異なる揺動同士の相互作用が示す時空間構造を明らかにした。

磁化プラズマ中の乱流競合状態を実験的に検証する例として、直線磁化プラズマ装置 PANTA において磁場 1300 G, 放電パワー6 kW の条件下で周方向モード数 $m=1$ と $m=4$ の構造を持つ揺動が非線形結合している現象を対象とした。この非線形結合により $m=4$ 揺動のサイドバンドモード($m=3, 5$)が形成されている。上記の放電条件において行ったトモグラフィ再構成データを解析したところ、 $m=3, 4, 5$ の揺動は時間的に一定の空間構造を示しているが $m=1$ 揺動は振幅がプラズマ中心部から周辺部に向けて伝播したり、空間構造がねじれたりする変化を示していることが明らかになった。

トモグラフィで観測された $m=1, 3, 4, 5$ 揺動の空間構造の安定性および非線形結合の時空間構造を定量的に評価することを目的として、structure function および modal coupling function と呼ぶ解析手法を開発した。Structure function は径方向および時間的に離れた位置において特定の周波数と周方向モード数を持つ揺動のコヒーレンスを評価する手法である。一方 modal coupling function は周波数および周方向モード数のマッチング条件を満たした揺動間で生じる非線形結合の時空間分布を評価する手法である。 $m=1$ 揺動の振幅の伝播が $r=2.5$ cm あたりに到達する時間をクロックにして条件付き平均法を行い、structure function と modal coupling function 解析を行ったところ、 $m=1$ 揺動の振幅が伝播するのに合わせて非線形結合の強い領域がプラズマ周辺部に伝播し、 $r=3$ cm あたりに到達したところでプラズマ周辺部全体で非線形結合が強くなることを明らかにすることができた。上記の結果は磁化プラズマ中で生じる輸送の突発的な変化に関して重要な知見を与えるものであり、現在 Scientific Reports で査読中である。

トモグラフィを用いて揺動の性質をモードごとに分解して時空間構造を解析することが可能になったため、揺動の分類をするうえで重要な電子温度密度分布を取得する Thomson 散乱計測の開発を広島大学において行った。PANTA の電子温度密度分布を一度に計測することを目的としてトリプル分光器を用いた TV Thomson 散乱計測の模擬実験を広島大学の TPD 装置で行った。初期実験の結果、実験室温度によってレーザーの光軸が数 100 μ m 程度ずれるために散乱光がスリットを通過する効率が変化するため密度計測の大きな誤差になることが明らかになり、場合によっては全く計測できない状態になることも明らかになった。これらの結果より、PANTA のような数 eV 程度の低温プラズマが持つ電子温度密度分布を一度に取得するためには、実験中にレーザー光軸の調整機構を導入するシステムが不可欠であると考えられる。

トロイダルプラズマにおける乱流揺動計測データの解析手法の 最適化研究

核融合科学研究所 清水昭博
九州大学応用力学研究所 藤澤彰英、井戸毅

重イオンビームプローブ(HIBP)は、高温プラズマ中の平衡電位と、電位揺動、密度揺動を局所的に、プラズマに摂動を与えずに、高空間・時間分解能で測定することができる。揺動計測において高い S/N 比を実現すれば、異常輸送の原因とされるドリフト不安定性に起因するミクロスケールの乱流揺動を精度良く計測可能である。HIBP の計測能力を効果的に活かすためには、プローブビーム電流を増大し、S/N 比を改善することが望まれる。本研究では、HIBP のイオン源を含めたビームガン設計改良により、ビーム電流を増大して S/N 比の改善を目指す。将来的に、PLATO 装置における HIBP 計測においてプラズマ中の局所乱流揺動を計測し、更に多チャンネル放射光計測のトモグラフィーによる全域計測と協働することで閉じ込め改善の研究に役立てることを目標とする。

PLATO 装置における HIBP は、各種の高圧電源、加速、ビーム引き出し、ビーム集束、イオン源フィラメント用の電源の準備が整った。調整運転を実施し、二次ビームの計測に成功した。平衡電位分布を測定し、負電場が生じていることを確認した。また、10 kHz の電位揺動が観測され、これは磁気プローブやマイクロ波干渉計にも同時刻に見られていることから、プラズマ中の電位揺動を確かに計測していることを確認した。何らかの MHD 不安定モードが観測されていると思われる。プローブビーム電流を増大して、S/N 比を上げれば、プラズマ中の乱流揺動計測が今後期待できる。

タイ国において建設され、運転が始まったトカマク TT-1 において、HIBP を設置することを検討している。本年度より、TT-1 の共同研究者と TT-1 における HIBP の設計研究を開始し、議論を進めている。来年度より、イオンガン等、必要なコンポーネントを段階的に準備する。将来的には PLATO における電位揺動データと比較し、共通する物理特性と相違点について研究する。

多チャンネル放射光計測によるトモグラフィについては、解析手法の検討を進めている。多数の視線計測によるデータから、プラズマ中の空間的な発光分布を得るためには、何らかの変換を行う必要がある。この変換手法には、様々な方法があり、例えば、2次元平面でメッシュを区切って各メッシュの発光値を代数的に求める方法や、フーリエベッセル関数等、適切な基底関数を選んでその級数の係数を求める方法がある。これらの手法には、それぞれ利点、欠点があり、ノイズを含む実験データの解析において、どの方法が最適であるかは、実際の揺動パターンにも依存し、一概には言えない。実験データの解析では、負の値が許されないことや、スムージングの有無等、実用的な側面/条件も考慮する必要がある。本研究では、テストデータを用いてトモグラフィの解析手法の検討、特に基底関数を替えた時に、解析結果にどのような影響が見られるかについて研究を進めている。また、直線装置 PANTA の実験データ解析への適用も考慮しつつ、解析手法の検討を継続する。

低放射化バナジウム合金の照射誘起析出の探索及び制御

核融合科学研究所 長坂琢也

1. 目的

低放射化バナジウム合金—液体リチウム冷却ブランケットは、Li-6 同位体濃縮をしなくても十分な燃料トリチウム増殖比を得ることが可能で、化学毒性が懸念されるベリリウムや鉛といった中性子増倍材も不要であるところが他の形式には無い特長である。バナジウム合金の中性子重照射実験において、照射硬化とスエリングが 30 dpa 程度までは増加するものの、それ以降は低下する、いわば照射効果の巻き戻し現象が報告されている[1]。これらの巻き戻しは、通常の熱処理では得られない照射誘起析出物 (Ti_5Si_3) の析出物の形成と同期していることから、それが照射欠陥の有効なシンクとなっていると解釈されている。このような巻き戻し現象を上手く活用すれば、重照射環境で自己回復し長寿命のバナジウム合金の開発が可能と考えられる。しかし、詳細なメカニズムは未だ不明であり、中性子重照射の機会が得られないため再現実験もなされていない。本研究では照射条件を系統的に変化させることが比較的容易な重イオン照射を用いてこのような照射誘起析出を再現することから始め、そのメカニズムを明らかにし制御すること、さらに他にも有用な照射誘起析出がないか、探索することを目的とする。

2. 実験方法

核融合炉用バナジウム合金の第一候補組成を持つ参照材料 NIFS-HEAT-2 (V-4 重量%Cr-4 重量%Ti 合金, NH2)、高純度 V-4Cr-4Ti モデル合金 (Z44) 及び、それらの強度を保ちつつ長半減期放射性核種を生成する Ti の含有量を減らした V-10Cr-1Ti 合金 (ZX1) を照射試料とした。2024 年度は応用力学研究所の重イオン照射システムを用い、照射誘起析出とスエリングが期待される 500°C で 15 dpa の Cu^{2+} イオン照射を実施した。照射後に強磁性材料ナノクラスター評価システムを用いて微細組織観察を行い、照射誘起析出とスエリングを調査した。さらに、超微小硬度計 (ナノインデント) を用いて照射硬化を評価した。

3. 実験結果と考察

微細組織、硬さともに評価が終了しているのは 500°C で 15 dpa 照射した NH2 についてであり、その結果を図 1 と図 2 に示す。図 1 より 15 dpa では微小転位ループと考えられる照射欠陥集合体は観察されたが、スエリングの原因となるボイドや照射誘起の新たな析出物は観察されなかった。図 2 より、照射材の硬さは押し込み深さ依存性が大きく一定ではないが、深さ 50~150 nm の領域に注目すると非照射に比較して 4~6 倍の硬さを示しており、高密度の照射欠陥集合体に対応する顕著な照射効果を確認できた。今後は照射量をさらに増やし、ボイドや照射析出物の発生及び、照射効果の変化を明らかにしていく予定である。

[1] H.M. Chung, J. Nucl., Mater. 239 (1996) 139-156.

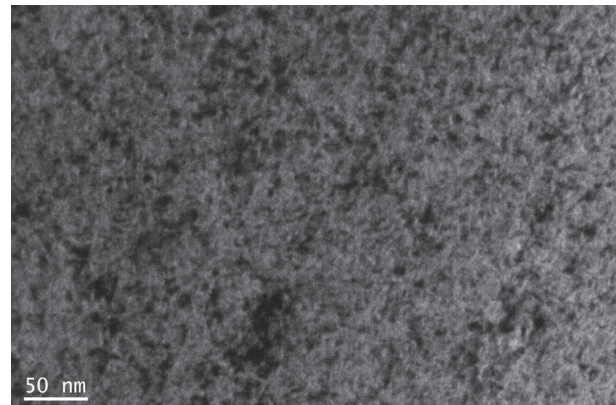


図 1 500°C で Cu^{2+} イオンを 15 dpa まで照射した V-4Cr-4Ti 合金 (NH2) で観察される照射欠陥集合体 (透過電子顕微鏡像)

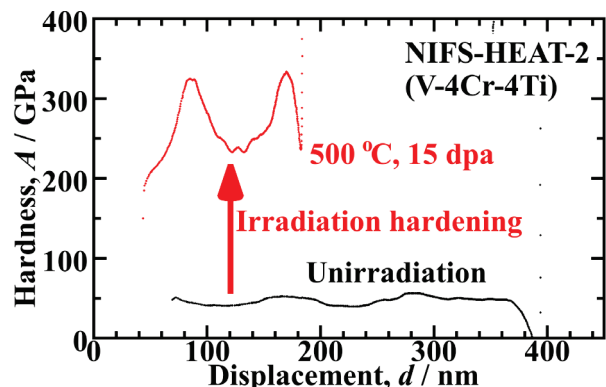


図 2 ナノインデント硬度の押し込み深さ依存性