

[27]全国共同利用研究成果報告

<https://hdl.handle.net/2324/7431319>

出版情報：全国共同利用研究成果報告. 27, pp.1-, 2024-03. 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

ハイエントロピー合金 (HEA) は、等原子組成比の 5 つ以上の元素で構成されており、ギブズ自由エネルギー配置エントロピーの寄与が大きい。従って、金属間化合物を形成することなく、面心立方 (FCC)、体心立方 (BCC)、六方最密 (HCP) 構造などの単純な結晶構造を持つ単相固溶体に形成することができる。HEA の最初の例として、FCC 単相固溶体 CoCrFeMnNi 等原子比の合金が報告された。この HEA は優れた機械的特性を備えた安定した合金であるため、広く研究されている。また、この HEA は優れた耐照射性を有することも報告された。最近、CoCrFeMnNi の降伏強度と引張強度を向上するため、析出させた (CoCrFeNi)₉₅Ti₁Nb₁Al₃ の HEA が開発された。本研究では、(CoCrFeNi)₉₅Ti₁Nb₁Al₃ の引張特性と照射による空孔集合体の形成について調べた。

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、0.2mm まで圧延した。微小引張試験片と 10mm の正方形試料を打ち抜き、真空中に 1273K で 1 時間焼鈍を行った。一部の試料をさらに 1023K で真空中に 8 時間の時効で析出をさせた。75%の酢酸と 25%の過塩素酸の溶液に 15V の電解研磨により試料表面の酸化膜を取り除いた。引張試験の歪速度は $2.0 \times 10^{-3}/s$ であった。10mm の正方形試料に対して 2.5MeV の鉄イオンにより 300K、573K 及び 773K で最大 1.5×10^{19} ions/m² まで照射を行った。損傷ピークは表面から約 800nm で、ピークの損傷量の最大は約 1.65dpa であった。照射の後に、低速陽電子ビームにより試料中の鉄イオン照射による空孔集合体の形成を調べた。

3. 実験結果と考察

図 1 に析出させた (CoCrFeNi)₉₅Ti₁Nb₁Al₃HEA の引張試験の結果を示す。比較のため、析出をさせていなかった試料、CoCrFeMnNi 及び CoCrFeNi の結果も示す。析出をさせていなかった試料の降伏と引張強度が CoCrFeNi より高かったが、CoCrFeMnNi より低かった。また、伸びも小さかった。一方、析出させた試料の伸びは殆ど変わらなかったが、降伏と引張強度は 200MPa 以上増加した。析出物の形成により HEA の力学特性が改善されたことが分かった。

図 2 に (CoCrFeNi)₉₅Ti₁Nb₁Al₃ における照射された低速陽電子のエネルギーと照射深さの関係を示す。この図から 2.5MeV 鉄イオンの照射により形成された欠陥の測定は 16keV の陽電子ビームが適切であることが分かった。以下の結果は 16keV の陽電子ビームを用いた測定である。図 3 に各温度で照射した析出させた (CoCrFeNi)₉₅Ti₁Nb₁Al₃ の陽電子消滅同時計測ドップラーブロードニング (CDB) を示す。横軸は電子の運動量で、縦軸は未照射試料との比である。低運動量領域 (< $5 \times 10^{-8}m_0c$) の値は空孔の形成を表す。空孔がないと思われるよく焼鈍された試料に比べ、もしその値は 1 より高かったら、空孔が存在する。従って、300K と 573K で照射した試料においては、空孔が形成された。これに対して、773K で照射した試料に空孔がなかった。また、高運動量領域の値は合金の構成元素の偏析・析出のものを表す。未照射試料に比べ、いずれの照射試料においても高運動量領域に顕著なピークが現れなかったため、照射による析出や偏析などがなかった。図 4 に 300K で照射量が多かった試料における焼鈍による欠陥の回復の CDB を示す。低運動量領域の値は焼鈍温度の上昇と共に減少した。これは照射によって形成された空孔集合体の密度が減少したと示唆している。また、773K まで焼鈍しても低運動量領域の値が 773K で照射した試料より高かった。773K で照射によって安定な空孔集合体の形成ができないことが分かった。さらに、773K まで焼鈍中に高運動量領域に析出や偏析を示す顕著なピークが現れなかったことからこの合金は 773K においても安定のものを示している。

4. まとめ

本研究では、析出分散強化 (CoCrFeNi)₉₅Ti₁Nb₁Al₃HEA の開発は成功した。この合金の降伏と引張強度は CoCrFeMnNi より 200MPa 以上増加した。また、この合金においては、照射による空孔集合体の形成とその熱安定性を調べた。室温 300K での照射では空孔集合体が形成され、一部は 773K での焼鈍後も安定に残った。一方、773K での照射では空孔集合体が形成されなかった。この結果は (CoCrFeNi)₉₅Ti₁Nb₁Al₃ の耐照射性が優れていることを示している。

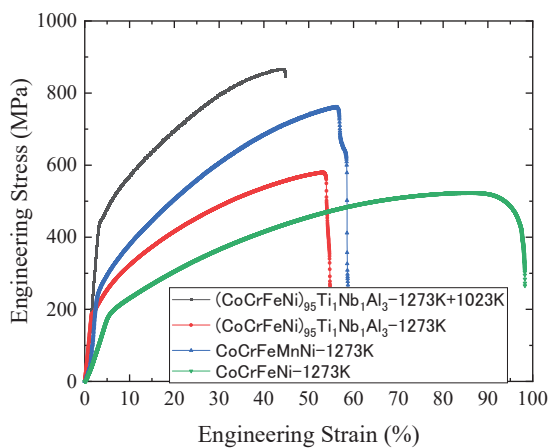


図1 CoCrFeNi、CoCrFeMnNi と焼鈍、時効した $(\text{CoCrFeNi})_{95}\text{Ti}_1\text{Nb}_1\text{Al}_3$ の引張試験結果

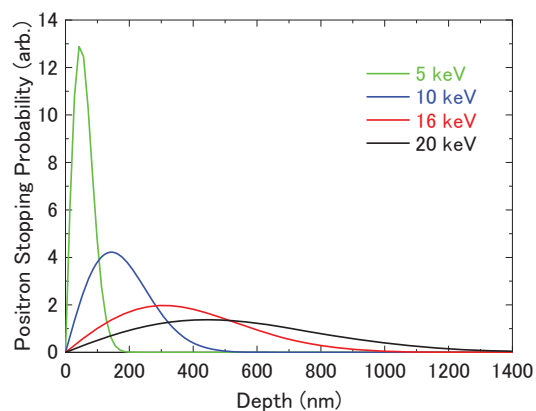


図2 $(\text{CoCrFeNi})_{95}\text{Ti}_1\text{Nb}_1\text{Al}_3$ における各エネルギー陽電子の深さ分布

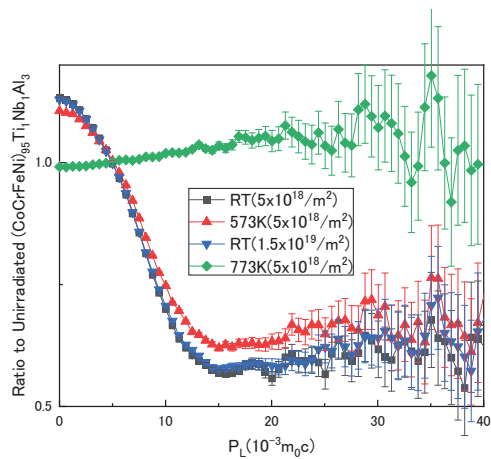


図3 各温度で照射した $(\text{CoCrFeNi})_{95}\text{Ti}_1\text{Nb}_1\text{Al}_3$ と未照射試料のCDB比の曲線

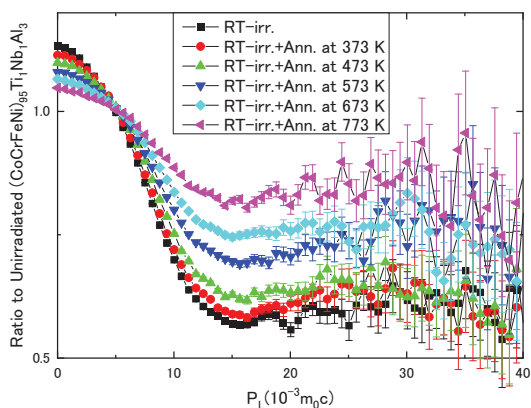


図4 300K 照射した試料の高温焼鈍による回復のCDB結果

直線磁化プラズマ装置における電磁乱流観測を目指した高ベータ実験

京都工芸繊維大学 河内裕一

要旨

本課題では、直線磁化プラズマ装置 PANTA において磁場を低く制御して実験を行うことで比較的高ベータ条件を作ることを目的として実験を行った。この実験により、ベータ値自体はそれほど変わらなかったものの、従来観測が不可能であった高波数乱流を、多チャンネルプローブによって高い時間・空間分解能で観測することに成功し、中性粒子ガス圧依存性について明らかにした。本成果は、Plasma Physics and Controlled Fusion に掲載され、カバーイメージにも採択された。今後は、観測された高波数乱流の質量依存性やマルチスケール相互作用の調査などを行なっていく。

研究目的

磁化プラズマ乱流の空間スケールはイオン実効ラーマー半径 ρ_s を基準に、 $k_{\perp}\rho_s \ll 1$ のイオンスケール乱流やそれよりもさらに細かいスケール、すなわち $k_{\perp}\rho_s \geq 1$ の高波数乱流に特徴づけられる。これまでのプラズマ乱流研究は、イオンスケールの静電的な乱流を対象に実験が行われてきた。近年、高波数乱流が異常熱輸送や異常加熱に寄与するとされており、研究対象として注目が集まってきた。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、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]。本年度は、本実験を発展させるためにパラメータ探索に着手する。

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)を利用して高波数乱流実験を行った。先行研究により磁場を 225G 程度にすることで高波数乱流が励起することが確認されている[1](図 1 参照)。本実験では、磁場以外のパラメータスキャンとして中性粒子ガス圧スキャンを行った。中性粒子ガス圧スキャンにより中性粒子とイオンや電子との衝突周波数が変わるため、波動の減衰や不安定性の成長率等が変わりうる。

計測には半径方向駆動プローブと周方向プローブを利用し、揺動の半径方向分布や、高波数乱流による密度揺動の時空間発展計測を行った。

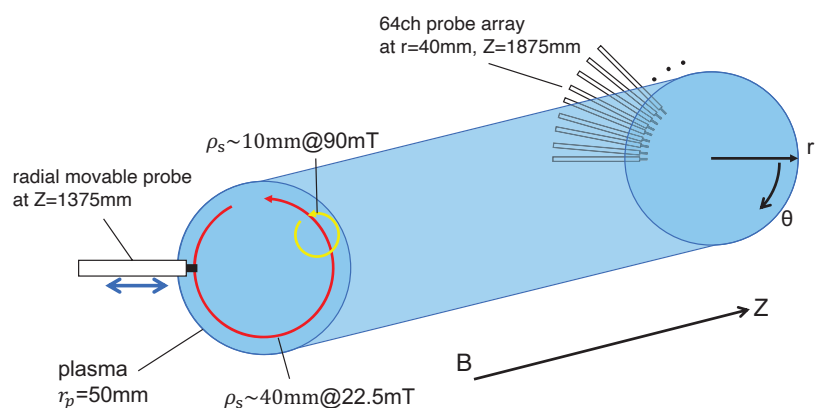


図 1: 高波数乱流励起実験の概要[2]

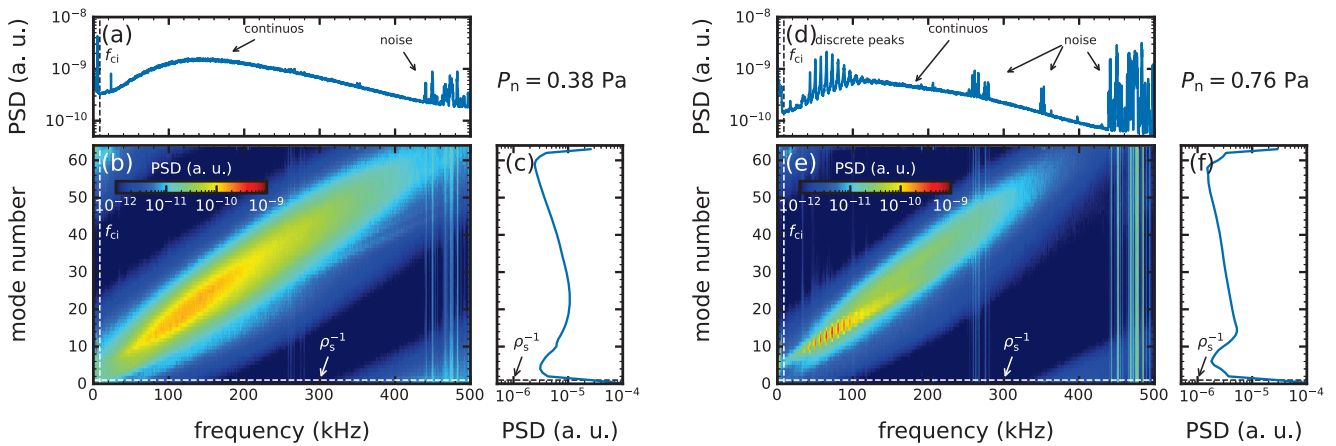


図 2: 乱流の二次元スペクトルの中性ガス圧依存性。(a)-(c)は中性粒子ガス圧 0.38Pa、(d)-(e)は中性粒子ガス圧 0.76Pa の場合を示す。(b),(e)は周方向モード数・周波数空間で分解された二次元スペクトルであり、これをモード数方向に積分したものが(a),(d)、一方で周方向に積分したものが(c),(f)である。

実験結果

高波数乱流励起実験における中性粒子ガス圧スキャンを行った際に得られた二次元スペクトルを図 2 に示す。ガス圧が 0.38Pa では先行研究[1]で得られたような波数空間・周波数空間においてブロードな連続スペクトルが観測された。観測された揺動の時空間構造はイオンの実効ラーマー半径よりも十分小さく、イオンサイクロロン周波数よりも十分速い現象である。中性ガス圧を 0.76Pa として中性粒子との衝突周波数を増やしたところ、ブロード連続スペクトルのパワーが減少し、離散的なピークが新たに現れた。(図 2 の(d)や(e)を参照)。さらにガス圧をスキャンした結果、この離散ピークはガス圧を増やすほどパワーが増加し、連続スペクトルのパワーは減少することが明らかとなった。さらに、離散ピークについてそのピーク間周波数を調べたところ、イオンサイクロロン周波数程度であることが明らかとなった。

考察

中性粒子ガス圧を変化させると、主に中性粒子との衝突周波数が変化する。連続スペクトルのガス圧増加に伴うパワーの減少は衝突による減衰が効いている可能性がある。一方で、衝突周波数が大きいにも関わらず離散ピークのパワーが増加することについては、寺坂・吉沼の理論解析の静電イオンサイクロロン波の特徴と類似している。また離散ピークのピーク間周波数がイオンサイクロロン周波数程度であることから、離散ピークはイオンサイクロロン運動に起因する不安定性の可能性が高いと考えられる。

成果報告

本研究の成果は、査読有科学雑誌 Plasma Physics and Controlled Fusion に掲載された[2](DOI: 10.1088/1361-6587/acfbf7)。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)

プラズマに対向した堆積層の動的水素リテンションに関する研究

京都大学大学院工学研究科 高木郁二

1. 目的

プラズマ対向壁表面における水素原子の反射は、水素原子の再結合と並んで水素リテンションを決定する重要な現象である。本研究では、分子動力学法を用いた計算によって、金属表面に水素原子が付着している場合の反射挙動を評価した。

2. 計算方法

分子動力学のコードはオープンソフトウェアである LAMMPS、ポテンシャル関数は多原子系に対応し、原子どうしの結合と解離を記述できる ReaxFF を用いた。固体は $8 \times 8 \times 8$ 格子の鉄結晶で入射粒子は 1 eV の重水素原子である。初期状態の鉄結晶に重水素原子を入射し続けて表面の重水素を飽和させ、その状態で更に重水素原子を入射させたときの反射率は角度分布を調べた。

3. 計算結果と考察

温度 373K の鉄における重水素の反射角(表面法線に対する角度)の分布を図 1 に示す。入射角(法線に対する侵入角)が 0° である(a)の場合は、 30° 付近にピークがあるように見える。表面は原子レベルの凹凸があり、大半の原子は凹部のポテンシャルで反射する。反射角が大きいと周囲の鉄原子に遮られてしまうので、ランダムな反射であるコサイン分布(実線)の大角度側がカットされたような形になったと考えられる。入射角が 15° 、 30° 、 45° でも同様の傾向が見られた。粒子反射係数は 0.10~0.16 であった。

60° 入射の(b)では、ランダムな成分はほとんど無く、 55° 付近に鋭いピークが見られ、大半の重水素原子が鏡面反射した。粒子反射係数は 0.38 であった。入射角 60° では 0° に較べて法線方向のエネルギーは 0.25 倍となることから、表面付近における等ポテンシャル面は、1eV では凹凸があり、0.25eV では平坦であると考えられる。

45° の入射(法線方向のエネルギー 0.5eV)では鏡面反射が見られなかったことから、サブ eV 程度の僅かなエネルギー差によってランダム反射と鏡面反射の違いが生じ、反射率も大きく異なることが分かった。

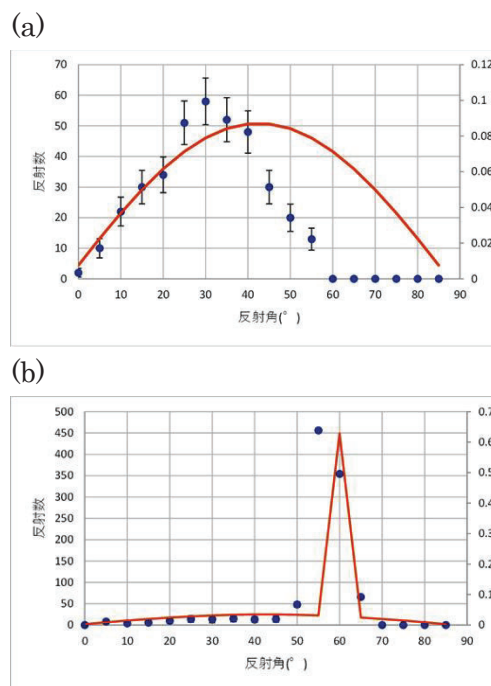


図 1 373K に(a) 0° 方向および(b) 60° から入射した重水素の反射角度分布

研究成果

なし

研究組織

代表者	高木郁二	京都大学大学院工学研究科	教授
研究協力者	花田和明	九州大学応用力学研究所	教授
研究協力者	森山瑠大	京都大学大学院工学研究科	修士 2 年
研究協力者	杉野目翼	京都大学大学院工学研究科	修士 1 年

トカマクプラズマにおける高衝突領域での乱流輸送の定量化研究

核融合科学研究所 登田慎一郎

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、不安定性励起の条件を評価する。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、衝突周波数がイオンと電子のバウンス周波数の間にあり、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。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。

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 $\rho = 0.65$ でト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 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。d-TEM モードは、 $\rho = 0.81$ 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。

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、熱処理条件の異なる7000系アルミニウム合金7H146のT6熱処理において、冷却速度の異なる3種類の材料を使用した。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℃/minで冷却したものを7H146A、空冷30℃/minで冷却したものを7H146A2、空冷20℃/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^(1,2)。

表1 7000系アルミニウム合金材料の特性

材料名	冷却条件 (空冷) [°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 Gaによる液体金属脆性を利用した粒界破面作成

図1にGaによる液体金属脆性の模式図を示す。アルミニウム材料に、Gaなどの低融点金属が付着すると、アルミニウム多結晶体の結晶粒界に侵入し、延性を急激に低下させて液体金属脆性 (LME) を引き起こす。これにより粒界上析出組織を詳細に観察でき、粒界析出組織を定量評価ができる。

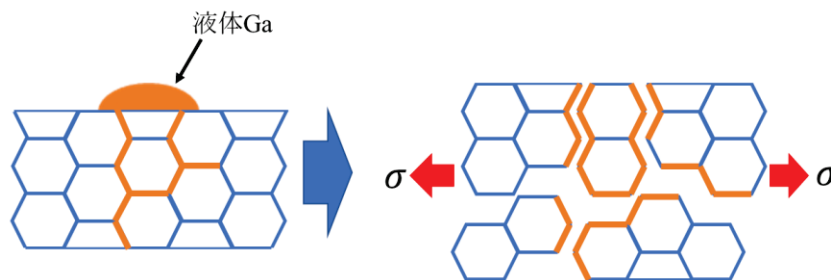


図1 アルミニウム多結晶体に及ぼすGaによる液体金属脆化現象の模式図

2.3 実験方法及び実験装置

短冊状試験片（10Wx30Lx1Tmm、圧延方向に垂直方向）を機械加工により切り出し、両面を耐水研磨紙及びアルミナ粒で鏡面研磨した。試験片中央部の溝に液体 Ga を塗布し、導電性テープを貼り付け、温度 50℃で 24h 保管した。その後、試験片を剛体で圧縮しながら長手方向に引張り破断させた。これにより、最も Ga の浸透が少ない粒界破面が出現し、結晶粒界の詳細な SEM 観察が実施できた。

3. 実験結果

3.1 Ga による液体金属脆性を利用した粒界破面の観察

7H146A や 7H146A2 に関しては図 2 のような比較的大きい平滑な結晶粒界が観察され、7H146A3 では比較的小さな結晶粒界が観察された。また、平滑で切れ目のない大きな粒界破面が観察できた。

7H146A2 と 7H146A3 では図 3 のような粒界内凹凸が多数観察され、粒界析出物の存在が明らかとなった。また、切断法によって結晶粒径の測定を行ったところ、冷却速度が遅くなる、扁平した結晶粒径が小さくなることが分かった。このことから、7000 系アルミニウム合金は、冷却速度の低下に伴って、結晶粒径の微細化及び多数の粒界析出物の出現により、耐水素脆化特性が向上したことが明らかとなった。

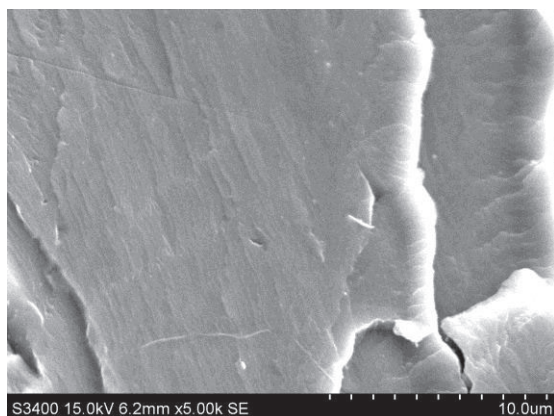


図 2 Fracture surface of 7H146A or 7H146A2.

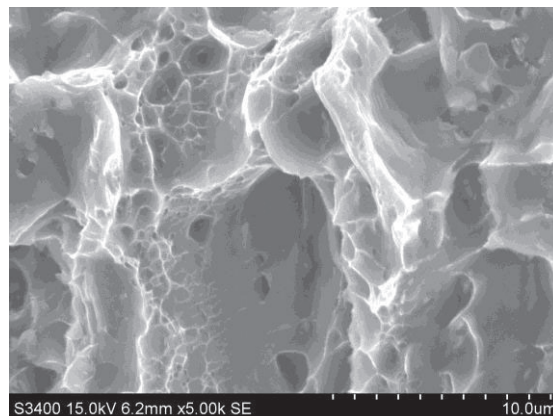


図 3 Fracture surface of 7H146A3.

4. まとめ

本研究は、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ために、T6 熱処理の冷却条件の異なる 3 種類の 7000 系アルミニウム合金に対して、Ga の液体金属脆性を利用した粒界破面を詳細に観察した。その結果、7000 系アルミニウム合金は、T6 熱処理の冷却速度の低下に伴って、結晶粒径の微細化及び多数の粒界析出物の出現により、耐水素脆化特性が向上したことが明らかとなった。

今後、STEM を用いた粒界析出粒子の定量的な評価を実施する予定である。

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火江名に関する研究”、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火江名に関する研究”、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.

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

茨城大学工学部 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、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】本年度の共同研究では ITER 仕様の純 W の高温での変形挙動を調べた。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、厚さ 0.5 mm である。引張試験時の初期歪速度は 1800°C では $2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 、 $5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ および $2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ で、1600°C では $5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ とした。得られたデータなどから、引張強度、降伏強度、全伸びおよび均一伸びの温度・歪速度依存性をこれまでのデータと共に整理し、高温変形の律速機構について検討した。また、破断した試験片の破面や表面は SEM を用いて観察した。

【結果】図 1 には、応力歪曲線を示す。破断伸びは温度の上昇とともに低下し、また、歪速度の増加とともに増大することがわかる。粒界すべりによる変形の場合、破断伸びは温度の上昇とともに増大し、また、歪速度の増加とともに低下するため、この純 W 圧延材の変形は、転位すべりによる変形であると考えられる。図 2 には、試験温度 1800°C で初期歪速度を $2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 、 $5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ および $2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ と変化した場合の破断後の試験片の側面および断面の SEM 像を示す。歪速度が大きくなるにつれて、破断面が絞られていることがわかる。また、破断後の表面観察ではすべり線が観察され、歪速度が速い程、すべり線が多くなっている。すべり面とすべり方向は、結晶学的にはほぼ決まっているが、各結晶粒の方位が異なるため、結晶粒間ですべり線の数や段の深さがかなり異なる。その結果、結晶粒間での表面凹凸が顕著となり、歪速度が速い程すべり線が多くなり、観察結果と一致している。図 3 には、初期歪速度が $2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ における変形強度 (塑性変形開始後、加工硬化率がほぼゼロになる応力。ヤング率 (E) で規格化) のアレニウスプロットを示す。図からわかるように、SR 材と RC 材の変形強度は領域 I (400°C ~ 1300°C) および II (1300°C ~ 1800°C) の二つの領域に分けることができる。領域 I では、RC 材は SR 材と比較して変形強度は半分程度に低下しており、再結晶による結晶粒の粗大化と転位密度低下により軟化したものと考えられる。また、SR(L-T)材の領域 II では直線関係が得られ、直線の勾配 Q/nR (Q : 変形の活性化エネルギー、 n : 歪速度の応力指数、 R : 気体定数) は 9800 K となった。また、1800 °C の変形強度と塑性歪速度の両対数プロットにより $n \approx 7.5$ が得られ、これらを用いて $Q \approx 610 \text{ kJ/mol}$ と評価された。

材料の塑性変形において、変形応力 (flow stress, σ_f) は試験温度 (T) および歪速度 ($\dot{\epsilon}$) に依存し、それらの間には次の関係が成立する。

$$\dot{\epsilon} = A(\sigma_f/E)^n \exp(-Q/RT) \quad (1)$$

ここで、 A は定数、 E はヤング率、 n は歪速度の応力指数、 Q は変形の活性化エネルギー、 R は気体定数、 T は絶対温度である。式 (1) の両辺の自然対数を取ると、以下の式となる。

$$\ln \dot{\epsilon} = \ln A + n \ln(\sigma_f/E) - Q/RT \quad (2)$$

右辺第一項は定数となり、したがって、変形応力の試験温度に対するアレニウスプロット ($\ln(\sigma_f/E)$ vs $1/T(K)$ のプロット) の直線の傾きが Q/nR を与える。この傾きの値に n と R を代入すると変形の活性化エネルギー Q が得られる。上述の値を代入すると $Q = 9800 \times nR = 9800 \times 7.5 \times 8.3 = 610$ kJ/mol となる。この値は、W の自己拡散の活性化エネルギー 526 kJ/mol および 666 kJ/mol(1700~3409K) [1] に近い。このことは、ITER-grade W の高温 (領域 II) における変形の律速機構は、内部応力の回復であることを示している。

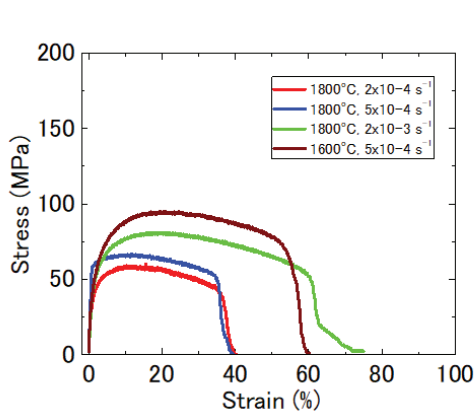


図1 応力歪曲線の歪速度依存性

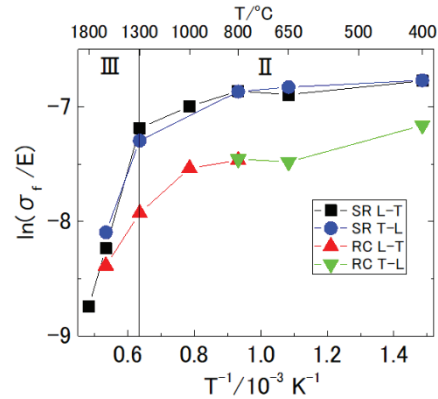


図3 変形強度の温度依存性 (アレニウスプロット)

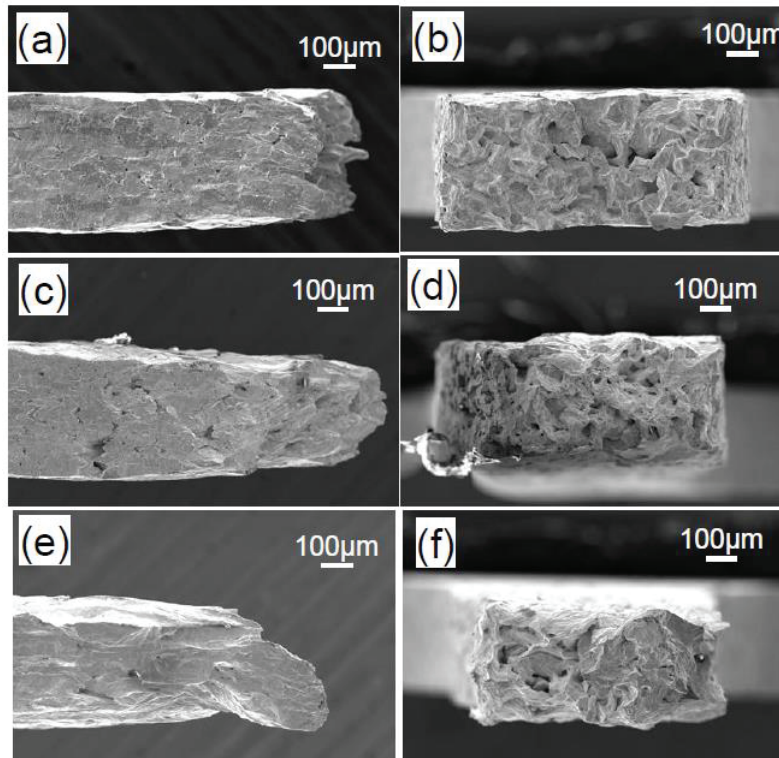


図2 破断試料(試験温度: 1800 °C)のSEM像、(a)および (b): $2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 、(c)および(d): $5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 、(e)および(f): $2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 、(a)、(c)および(e): 側面、(b)、(d)および(f): 破面

参考文献 [1] J. N. Mundy et al., Phys Rev. B 18(1978)6566-6575)

PLATO トカマクにおける周辺乱流密度揺動の計測のためのガス パフイメーシング計測装置の開発

核融合科学研究所 小林達哉

1. 研究目的

周辺のプラズマ乱流分布は、閉じ込め領域だけでなくその外側のスクレイプオフ層(SOL)を含む広い領域で決定されることが知られている。異なる磁場トポロジーをまたぐ領域における乱流のモデル化は開放系における複雑な物理現象を理解する上で有意義な課題である。これを検証するためには、周辺およびスクレイプオフ層での乱流揺動を、同時多点計測する必要がある。本研究では、詳細なプラズマ乱流物理研究が可能な小型トカマク装置 PLATO に於いて、新規にガスパフイメーシング計測装置を導入し、乱流計測を行うことを目的とする。

2. 研究結果

ガスパフイメーシング装置の詳細設計及び動作試験をする予定であったが、PLATOのプラズマ立ち上げが予定通り進まなかったため、機器導入をすることができなかった。代替策として、応用予定のデータ解析アルゴリズムの整備を進めた。これまで乱流の計測は、計測原理の制限から、密度揺動をターゲットとしたものが多かった。一方、乱流スプレディングや乱流輸送など、物理的に重要なトピックを実験的に扱うためには、乱流速度場の計測が重要となる。直接計測が困難な速度場を推定する手法として、揺動パターンを追跡する Velocimetry法が開発され、応用されている[1]。一方で、推定結果の妥当性や推定誤差の評価のため、複数アルゴリズムの比較が望まれていた。本研究では、太陽光球面観測でしばしば利用される「Local Correlation Tracking (LCT)」[2]と[1]で利用されている「Orthogonal Dynamic Programming - Particle Image Velocimetry (ODP-PIV)」手法を擬似乱流データに適用し、結果を比較した。

擬似乱流データは、白色ガウスノイズにローパスフィルタをかけたものを利用した。60x60ピクセルの2次元データを対象とし、ローパスフィルタのカットオフ波数をスキャンすることで、典型的な乱流セルのサイズを変え、Velocimetryの結果に与える影響を議論した。乱流データに対し、テスト速度

場を与え、連続の式を数値的に解くことでテストデータを作成した。ここでは、乱流場を時計回りに作動回転させるように速度場を与えた。周辺で速度を0にすることで、境界の効果を無視できるようにした。与えた乱流場及び速度場 (v_x , v_y) を図1に示す。

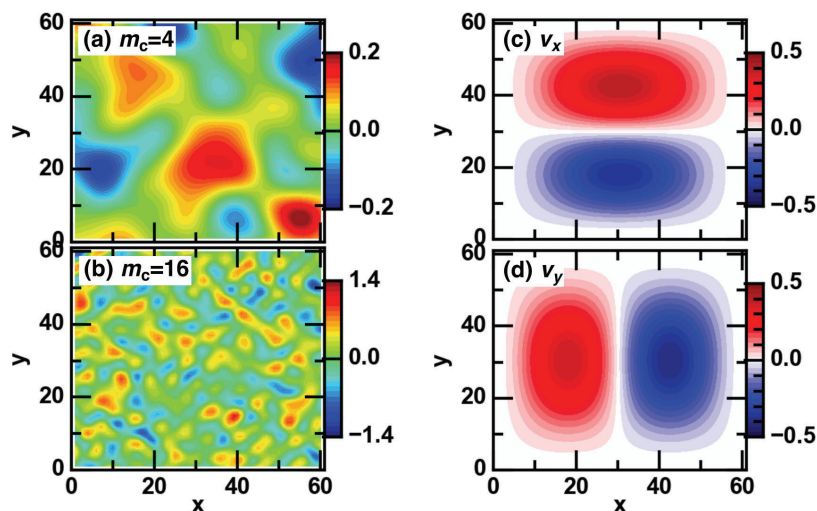


図1. テスト乱流場[スケールファクター(a) $m_c=4$ 及び(b) 16]、及びテスト速度場[(c) v_x , (d) v_y]。

Velocimetry の結果を図 2 に示す。2 種類の LCT コード(Flowmaker, FLCT) 及び ODP-PIV を比較した。 $m_c=4$ の場合、乱流セルが速度場と同程度の空間スケールとなる。この場合、乱流セルの形状変化が避けられないため、推定精度が悪化した。このような状況下でも、LCT コードは ODP-PIV コードと比較し妥当な結果を得た。 $m_c=16$ の場合は乱流セルが速度場の空間スケールより小さく、トレーサーとして扱うことが妥当となると考えられる。Velocimetry 精度も向上し、ノイズは小さくなった [3]。

ODP-PIV 手法は 1 次元的なトレーサートラッキングをイタレーティブに行うため、トレーサーの形状変化が起こるとトレーサーを見失ってしまうことが考えられる。LCT 手法は 2 次元空間上で直接トラッキングを行うため、トレーサー形状の変化に強く、妥当な結果をもたらしたものと考察される。

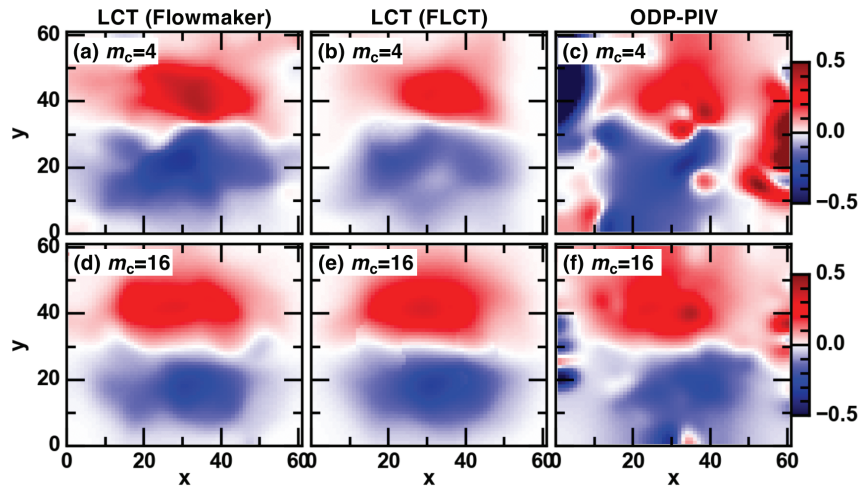


図2. Velocimetry結果。上段は $m_c=4$ の場合、下段は $m_c=16$ の場合。左列はLCT (Flowmaker)、中列はLCT (FLCT)、右列はODP-PIVの結果を表す。

3. まとめ

小型トカマク装置 PLATO に適用予定の Velocimetry コードの比較研究を行った。空間分解能に限られる小型プラズマ装置におけるイメージング計測では、計測対象の速度場が乱流セルと同程度のスケールになることが考えられる。このような状況下でも、LCT 手法は比較的精度の良い速度場推定を与えることが明らかになった。より定量的な性能評価は、[3]に詳述した。

研究組織

文 賛鎬（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] S. Banerjee, et al., Rev. Sci. Instrum. 86, 033505 (2015).
- [2] L. J. November and G.W. Simon, Astrophys. J. 333, 427 (1998)
- [3] Tatsuya KOBAYASHI, Ryohtaroh T. ISHIKAWA, Motoki NAKATA, Takayoshi OBA and Yukio KATSUKAWA, Plasma and Fusion Research 18, 1402058 (2023)

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

従来、水素グロー放電を利用した金属試料への水素注入法を金属材料中の拡散挙動研究に採用してきた。この方法は、注入法としては簡便で、水素注入量の再現性などもよい。しかしながら、装置の構造上、室温のみの注入であり、加熱した環境下での注入ができていなかった。そこで今年度は、試料を加熱しながら水素同位体注入することを目的として放電装置を改良した。さらにその装置を用いて、金属タンタル (Ta) 試料を用いて、加熱を行いながらの重水素放電注入実験を実施し、その Ta 試料の昇温脱離ガス分析 (Thermal Desorption Spectrometry, TDS) によって重水素が注入されていることを確認した。

2. 実験

図 1 に、試料を加熱できるように改良した放電注入装置を示す。石英ガラス管内に、Ta 円板試料 (直径 5mm、0.7mm²) を固定した SUS 電極 (図 2) をセットする構造で、試料を外部ヒータで加熱しながら重水素の放電が可能である。Ta 試料の温度を室温、100℃、200℃で重水素放電注入を行った。放電条件は、放電電圧を 1.8kV、重水素圧力を 0.5 Torr、放電時間 1 時間とした。放電実験後、Ta 試料を取り出し、TDS 装置にセットした。真空引き後、試料を昇温速度 0.5 °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。

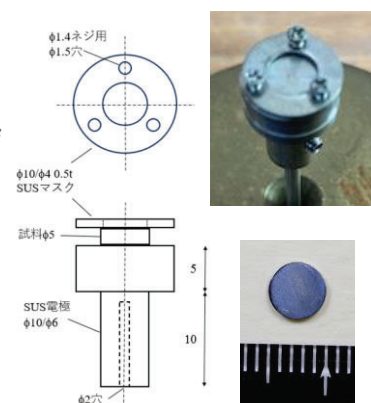
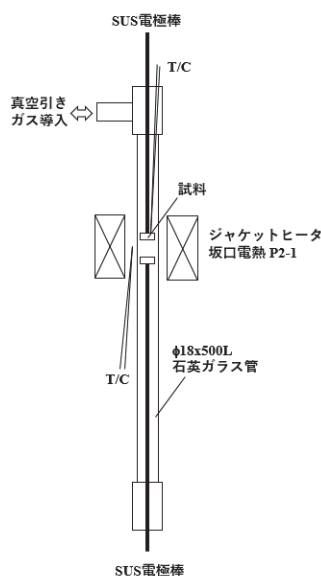


図 1 加熱放電注入装置

図 2 SUS 電極と Ta 試料

3. 結果

図 3 に Ta 試料からの D₂ 昇温脱離スペクトル (緑線) を示す。各注入温度で D₂ 放出が確認された。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ることが分かる。

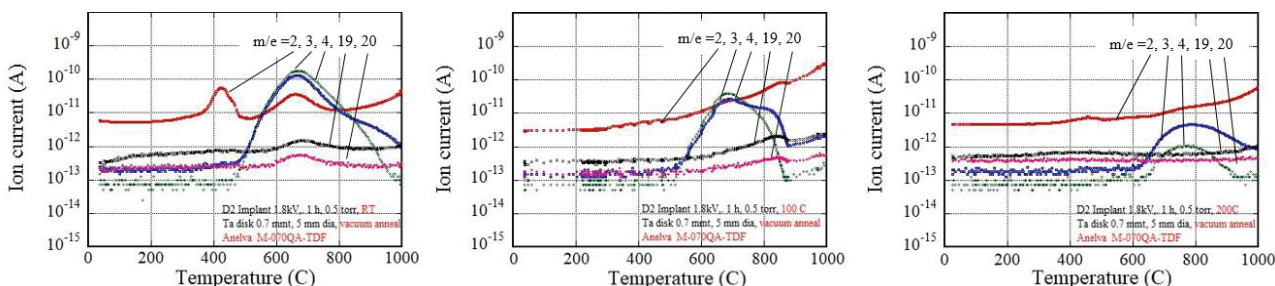


図 3 TDS 結果 (左：室温注入、中：100℃注入、右：200℃注入)

4. まとめ

グロー放電水素注入装置を、金属試料を加熱しながら注入できるように改良した。Ta 試料を 200℃まで加熱しながら重水素注入を行い、TDS 法にて試料への重水素注入を確認した。

5. 研究組織

九大総理工：橋爪健一 大学院生：河股大翔 九大工：赤田大和、大西駿祐 九大応力研：渡邊英雄

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

球状トカマク装置 QUEST は、運転開始時より全金属壁環境下で実験を遂行し、2015 年には壁温 473K で6 時間放電を成功させる等、粒子循環プロセスの理解とその制御法の開発という定常プラズマ維持研究の進展に貢献してきた。QUEST の金属壁は、タングステン部とステンレス部から成る。QUEST のタングステン部は、一部を除き大部分が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、バルク材の導入が検討(一部進行)しつつある。

本研究は、バルク材の導入に当たり、核融合研で新たに開発された「放電プラズマ焼結 (SPS)」でタングステンとステンレスを接合した壁材を製作し、QUEST への導入を目指す。

2. 接合材製作の方法

初年度となる令和5年度は、核融合研で開発した SPS による接合材が QUEST の設置基準を満足するか否かを調べるために、真空容器壁(非ダイバータ領域)への適用を念頭に入れた、タングステンとステンレス鋼の接合材を製作する。良好な接合が得られた場合は熱負荷試験を行うとともに粒子吸蔵特性等を調べる。SPS 接合時には、熱応力を緩和するために、中間層(インサート)として、1mmのニッケル層(粉末として挿入)を設ける。

3. 結果

先行研究で製作した、ロウ付け接合による接合材との比較を行うために、当初、同じ仕様の材料(タングステン: 0.1mm×50mm×50mm、ステンレス: 5mm×50mm×50mm)で SPS 接合を試みたが、高い圧力をかける SPS の工程で、0.1mmのタングステン箔が、パンチに固着するトラブルが発生した。このため、タングステンの厚さを 1mmに変更し、再度接合を試みた。接合後はタングステン側が凸となる反りが発生したが、接合面に剥離等は見られなかった。しかし、最終形状に成型するためにワイヤーカットを行ったところ、応力開放が起こり、タングステンとニッケルインサートとの接合面に剥離が生じた。これは、ニッケルインサートがタングステンとステンレス鋼の間に生じる熱応力を緩和できなかったためで、現在、多層化したインサートを設計し、本年度内に再度接合を実施する。また、タングステンを小片化()し、熱応力を緩和する方法を検討する。

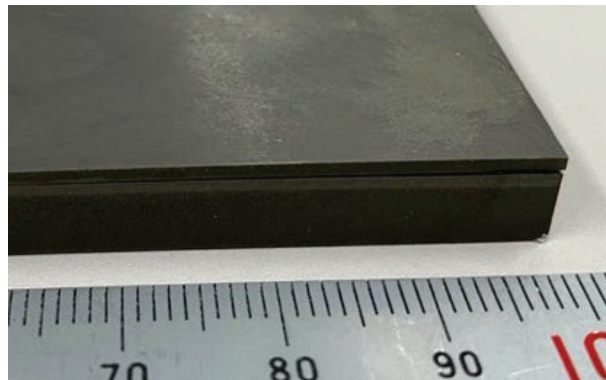


図1 ワイヤーカット後に生じた剥離

4. 研究成果報告

森崎友宏、村瀬尊則、時谷政行、花田和明、島袋 瞬、諫山明彦、林 孝夫、坂田浩章、北垣慎二、曾我部敏明、塩崎智広 (プラズマ・核融合学会 第40回年会、27P47、2023年11月27日)

5. 研究組織

核融合研: 森崎友宏(研究代表者)、村瀬尊則、時谷政行、 九大: 花田和明(世話人)、島袋 瞬

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(現 九州大学) 嶋田雄介

1. 目的

原子力材料は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 (例えば元素カラム分解能) と高い再現性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開発することを目的としている。さらには、本解析手法開発の実現後には、実材料として中性子照射された压力容器鋼中の照射欠陥ならびに転位周辺の元素分析を行うことで、ひずみ周りの特定元素偏析などの解析を試みる。そのなかで、2021 年度は低合金鋼を用いて不可逆的な実験である TEM 内その場加熱観察の条件探索を行った。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。

2. 実験方法

本研究課題は大洗センターと応力研間の拠点を越えた連続的な組織解析により目的の達成を試みている。今年度は試料として F82H 鋼 (中性子照射量: $9.2 \times 10^{23} \text{ n/m}^2$) を用いて、その場加熱 WB-STEM 観察を実施し、転位ならびに照射欠陥集合体についてその挙動の解析を行った。実験は大洗センターにて、応力研の収差補正 STEM 装置と同型機 (ARM-200F: 日本電子製) において実際に持ち込み予定の特殊ホルダー (日本電子製) を用いて、代表者および協力者の吉田准教授ならびに九大世話人の渡邊准教授と適宜打ち合わせながら遂行した。本特殊ホルダーは我々のグループが独自開発したカートリッジ式のもので、試料傾斜機構を含む先端部をそのまま取り外し、応力研をはじめ、試料をセットした状態で外部に L 型輸送が可能であることが特徴である。

まず観察試料の準備として、試料の電子線に対する磁性影響を抑制するため、試料を FIB マイクロサンプリングにより $20 \mu\text{m}$ までの微小サイズに加工した。この効果は、FIB 試料を用いた高分解能 TEM 観察などから確認している。次に、本課題に適した転位組織観察手法として WB-STEM 観察を採用し、EDS 計測のために最適となる試料傾斜範囲 (X 軸傾斜で約 10 度) において電子線入射条件を調整し、その近傍に分布する照射欠陥のその場加熱観察を行った。

3. 実験結果および考察

F82H 鋼 (Fe-8Cr-2W-0.04Ta-0.1C) では、中性子照射材に硬さ試験、3D-AP 計測、WB-STEM 観察を実施し、溶質原子クラスターの化学組成や転位ループのサイズ分布・数密度を評価した。それにより、従来の照射欠陥分析では分からなかった照射欠陥集合体 - 転位複合体の形成など照射脆化機構における新しい素過程が見つかった。

図 1 に、未照射および中性子照射された F82H 鋼について、3D-AP 計測によって得られた Si および Cr のアトムマップを示す。未照射では、Si・Cr はほぼ均一に分布していた。照射量 $1.9 \times 10^{22} \text{ n/m}^2$ および $5.5 \times 10^{22} \text{ n/m}^2$ でも Si・Cr の分布はほぼ均一だったが、照射量 $3.0 \times 10^{22} \text{ n/m}^2$ では Si 分布はやや不均一になった。Cr 分布はほぼ均一だった。照射量 $9.2 \times 10^{23} \text{ n/m}^2$ では、Si は線状に濃化していた。これは、転位への Si 濃化と考えられる。この時の濃化係数(線状濃化領域における Si 濃度とマトリクスにおける Si 濃度の比)は約 9 であった。Si 濃化領域では、わずかに Cr も濃化している傾向も認められた。また、拡大図(赤枠)に示すように Si が円環状に濃化した領域も観察された。

次に、本研究では WB-STEM を用いて、初期的な硬化が確認された照射量 $1.9 \times 10^{22} \text{ n/m}^2$ および Si 偏析が見られた照射量 $9.2 \times 10^{23} \text{ n/m}^2$ の F82H 鋼の照射欠陥集合体の定量解析を行った。

図 2 には、回折条件 $B=[111]$, $g=1-10$, ($g, 4g$) で撮影した明視野 WB-STEM 像(g_0)および暗視野 WB-STEM 像($2g$)を示す。簡単のために照射量 $1.9 \times 10^{22} \text{ n/m}^2$ の試料を H1、照射量 $9.2 \times 10^{23} \text{ n/m}^2$ の試料を H4 と呼称する。転位ループを含む照射欠陥集合体の平均サイズは H1 で $6.4 \pm 0.2 \text{ nm}$ 、H4 で $7.7 \pm 0.2 \text{ nm}$ であった。膜厚判定プログラムによって観察領域の試料厚さが実測され、数密度は、H1 で $4.9 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ 、H4 で $6.6 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ であった。F82H 鋼中の照射欠陥集合体は、低照射線量の試料から確認でき、線量増加に伴い、平均サイズと数密度が緩やかに上昇する傾向が見出された。転位のバーガーズベクトル解析の結果、F82H 鋼中の照射欠陥集合体には、低合金鋼中性子照射材などでも報告されているバーガーズベクトル $b=1/2\langle 111 \rangle$ の転位ループが含まれることが確認された。さらに、転位ループよりも周期性の低いひずみ場(等方的なひずみ場)を有する照射欠陥集合体が多く存在していることも分かった。

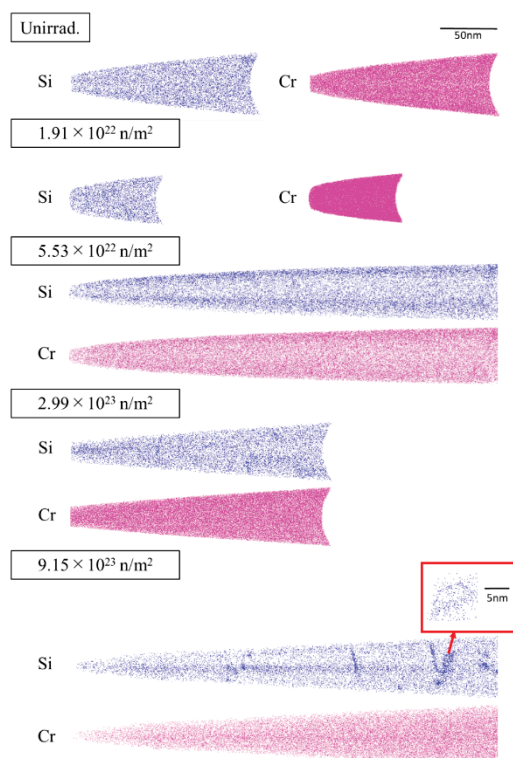


図 1 未照射 F82H 鋼および中性子照射された F82H 鋼の Si および Cr のアトムマップ。紙面奥行き方向の厚さは 20 nm。照射量 $9.15 \times 10^{23} \text{ n/m}^2$ については、Si の円環状濃化領域を拡大図(赤枠)に示す。

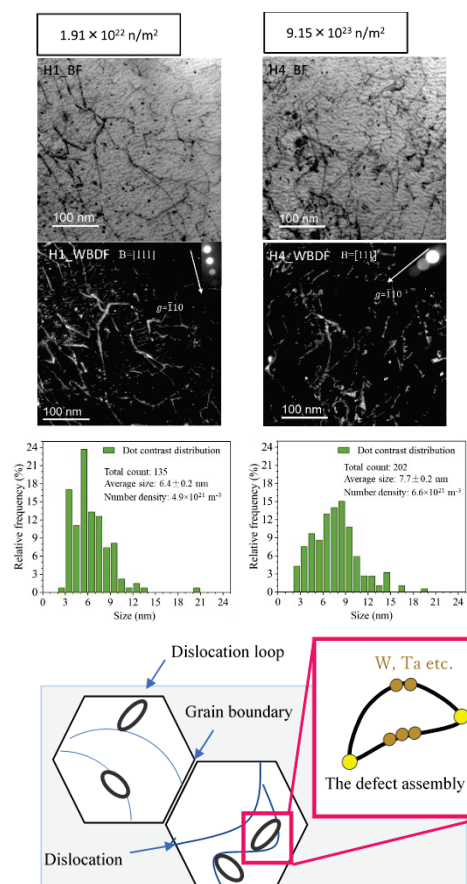


図 2 中性子照射された F82H 鋼の照射欠陥集合体 WB-STEM 像と定量解析結果。

ランジュバン系を用いたプラズマ中の非線形現象のモデリング

Langevin modeling of nonlinear phenomena in plasmas

富山大学・学術研究部・教育学系 成行 泰裕

研究目的：

プラズマ中の非線形現象はスケール間結合を伴っているものが多いが、磁気流体スケールの現象の理解においては、イオン・電子スケールのマイクロな現象に対して何らかの近似や平均操作を用いた記述が必要になる。このことは、大規模な運動論シミュレーションが可能になった今でも本質的には変わっておらず、実験室プラズマと宇宙・天体プラズマ双方に共通した課題である。本研究課題は、ランジュバン系を用いた解析を通じてプラズマ中の非線形現象を新しい視点から記述すること、およびそれを踏まえて実験室プラズマと宇宙・天体プラズマの新しい接点を探索するための新しい実験の提案や新規の実験データの解析法などを提案することを目的としている。

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：

昨年度・一昨年度はそれぞれイオン・電子スケールに関係した現象を議論していたため、本年度は流体スケールに関するランジュバンモデルについての検討を行った。近年「その場」観測が進められている太陽近傍の太陽風プラズマにおいては、Taylor の凍結流仮説 [Taylor, 1938] が成立しない可能性が認識されており、大スケール擾乱による sweeping 効果を含んだモデルも近年提唱されている [Bourouaine + Perez, 2020; and references therein]。このモデルは大スケール擾乱と乱流との非局所相互作用をランダム振動子の形でモデル化したものであるが、ゾーナル流とドリフト波乱流の相互作用に関しても同様の観点からモデル化が行われている [e.g., Krommes, 2009; 2015]。特に、内部太陽圏で良く見られるアルヴェン的な状態(高クロスヘリシティ一流)では、乱流を構成する擾乱が一方向伝搬に近い状況になるため、ポロイダル方向に伝搬するドリフト波乱流と良いアナロジーがある。

各波数モードの時間発展をランダム振動子でモデル化した場合、最も簡単な形では平均値が時間とともに減少する振幅一定のモデルになる [e.g., Gardiner, 2009]。これは、フーリエ位相を確率変数と見なしたモデルに相当しており、強度一定の白色ガウスノイズを考える場合のフーリエ位相はブラウン運動(Wiener 過程)になる。一方で、乱流中のフーリエ位相には有限の位相相関があることは、宇宙プラズマ [e.g., Hada et al, 2003] や実験室プラズマ [e.g., Yamada et al, 2010] でも指摘されており、その場合は各波数モードの位相の時間発展も独立にはならない。

位相相関を含む系への拡張には幾つかの選択肢があるが、ここでは最も簡単な以下のようなモデル(Ornstein-Uhlenbeck 過程)を考える(W は標準 Wiener 過程):

$$d\theta = -\beta(\theta - \theta_0)dt + \sqrt{2\gamma}dW$$

これは、各フーリエモードの位相が同じ値の周りで揺らいでいるモデルであり、ノイズが無い場合は位相相関指数[Hada et al, 2003]を評価する際の位相を揃えたサロゲートデータに相当している。この θ を位相とした複素振幅 $\psi = |\psi|e^{i\theta}$ のアンサンブル平均($\langle \psi \rangle$)の大きさの時間変化を描いたものが Fig.1 である。Fig.1 より、ドリフト項の係数(β)が大きいほど(θ の定常分布の幅が小さいほど) $|\langle \psi \rangle|$ の減衰が小さいことが分かる。今後は、より一般的に位相相関を記述する確率モデルの検討などを通じ、宇宙・天体プラズマと実験室プラズマとの新しい接点の探索を続ける。

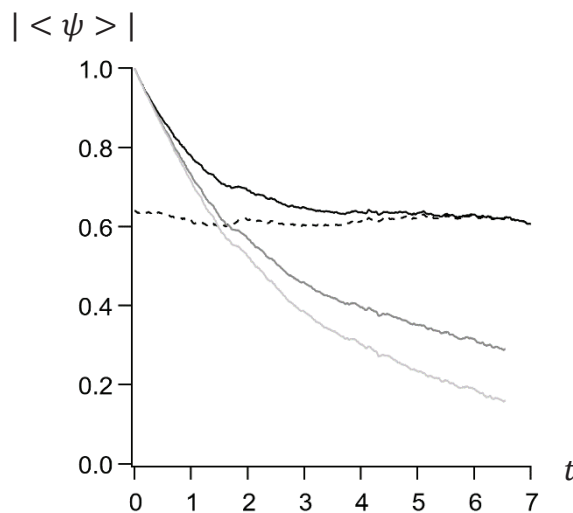


Figure 1 $|\langle \psi \rangle|$ の時間変化($\gamma = 0.32$, $\beta = 0.32$ (黒実線), 0.08 (灰実線), 0.01 (薄灰実線))。実線は $\psi(t=0)=1$ の場合で、破線は初期位相を幅 2π の一樣分布で与えた場合である。

公表状況(学会発表) :

Yasuhiro Nariyuki, Yusuke Kosuga, Shogo Isayama, Tohru Hada, On stochastic processes generating non-Gaussian particle distributions in the heliospheric plasm, 日本地球惑星科学連合 2023 年大会, PEM16-P06, オンラインポスター(5/23)

研究組織 :

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

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

核融合炉の実現に向けた要素技術開発において、高い中性子照射耐性や機械的な高強度を満たす W/Cu 合金接合構造のダイバータが注目されている。特に、ダイバータのヒートシンク材として作用する Cu 合金においては、高い熱伝導率と中性子照射及び高温下での高強度が要求されており、そのために析出強化あるいは分散強化された銅合金が注目されている。核融合研においても、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 $\text{Cu-Y}_2\text{O}_3$ 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 $\text{Cu-Y}_2\text{O}_3$ 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、重イオン照射試験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 (Gridcop) との比較することで今後の中性子照射実験体系や最適構造設計に繋げたいと考えている。一方で、核融合炉における高磁場超伝導マグネットにおいて高磁場による電磁力印加に耐え得る高強度化が要求されている。つまり、ダイバータ向けに開発した分散強化銅合金を超伝導マグネット用の超伝導素線の高強度化に資する電氣的・熱的安定化部材として波及することも期待できる。

2. 実験方法

$\text{Cu-Y}_2\text{O}_3$ 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 Cu^{2+} イオン照射実験を計画しており、最初に照射実験条件を TRIM 計算コードにて検討した。並行して、照射実験に供する MA-HIP 法 $\text{Cu-Y}_2\text{O}_3$ 合金及び W/ $\text{Cu-Y}_2\text{O}_3$ 合金接合構造体を核融合研にて作製した。

3. 結果と考察

照射実験に供する MA-HIP 法 $\text{Cu-Y}_2\text{O}_3$ 合金及び W/ $\text{Cu-Y}_2\text{O}_3$ 合金接合構造は問題なく作製することが出来、照射実験に供する試験片加工を進めている。照射実験を実施するにあたり、照射条件が重要である。図 1 に TRIM 計算コードによって見積もられた Cu 試料片表面から深さと損傷速度の相関性を示す。 Cu^{2+} 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。TRIM 計算の結果、Cu 試料における最大の損傷速度は試料表面から 645 nm の深さで 5.737×10^{-4} dpa/sec と見積もられた。実際の Cu^{2+} イオン照射実験では、最大の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、目的の照射損傷組織を得ることとする。

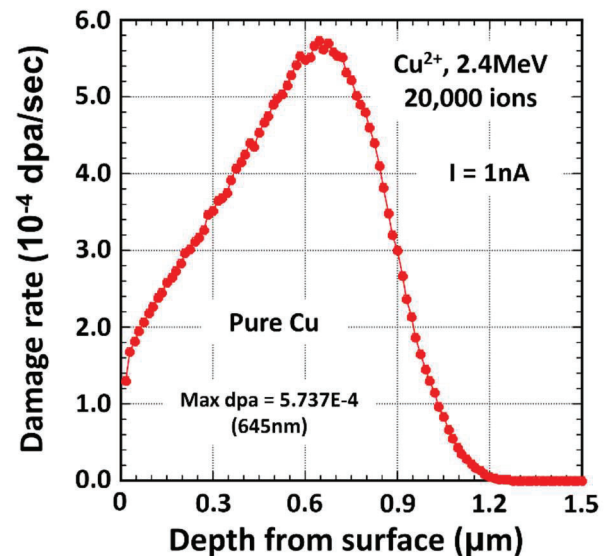


図 1 TRIM 計算コードで見積もられた Cu 試料における Cu^{2+} イオン照射損傷速度と試料深さの相関性

長時間放電におけるタングステン壁排気の物理素過程の解明と制御

九州大学応用力学研究所 中村一男

目的： QUEST および LHD における長時間放電を支配する壁排気について、タングステンに特化してその物理過程の解明と制御を目的とする。本共同利用研究では、APS-W の壁排気の物理素過程を解明するとともに、その制御の方法の探索を目的とする。

はじめに： タングステン (W) は高融点、高熱伝導度、低熱膨張率、高質量密度を有する耐熱材料である。Wコーティングは核融合炉における冷却配管、熱シールドなどの表面特性の改善に利用される。溶射Wの壁排気の物理素過程を解明するには、溶射過程の解明、溶射Wの特性評価が必要である。溶射Wの熱的特性評価として、電子ビームを熱源とした熱負荷装置を用いた熱負荷実験が共同利用研究でなされている[1]。熱負荷実験後の試料の表面付着物の確認や損傷発生原因の推定のため、九州大学応用力学研究所では昇温脱離ガス分析装置が活用されている[2,3]。本 TDS 装置における昇温加熱制御、ガス分析データの入出力、データ解析、解析結果表示は Windows10 に移行すべくハードウェアおよびソフトウェアを更新した。加熱制御電源における昇温加熱制御ではデジタル指示調節計 (PID 制御部) とサイリスタレギュレータ (アクチュエータ部) を用いており、後者を更新する前の特性試験を行った。

更新・試験内容： デジタル指示調節計においては、パソコンからの温度指令値 (目標値) を受取り、試料温度 (制御対象) を熱電対、温度変換器にて計測して、両者が一致するように、試料加熱ヒータの電流指令値をサイリスタレギュレータに送出している。サイリスタレギュレータにおいては、指示調節計からの電流指令値 (目標値) を受取り、試料加熱ヒータの電流 (制御対象) を電流変成器 CT にて計測して、両者が一致するように、サイリスタの点弧位相角をフィードバック制御している (図 1)。試料加熱ヒータにおける温度のヒータ電流に関する時定数は、サイリスタレギュレータにおけるヒータ電流の点弧位相に関する時定数に比較して十分長いので、両者は独立してフィードバック制御可能である。サイリスタレギュレータ JM において電流指令値を段階的に上げた場合の出力電圧波形 (10:1 電圧プローブ) および出力電流波形 (電流変成器 CT + 移動平均) (図 2) は良好な制御特性を示している。

- [1] K. Tokunaga, et al.: Thermomechanical Behavior of Plasma Spray Tungsten Coated Reduced-Activation Ferritic/Martensitic Steel, Journal of IAPS, Vol.24, No.2 (2016) 73-78.
- [2] K. Tokunaga, et al.: Combined effects of low energy helium irradiation and tensile strain on surface modification in ITER, International Conference on Fusion Reactor materials, 25th-28th October 2021, Granada, Spain.
- [3] 土屋 文, 寺沢亮輔, 片岡啓介, 徳永和俊: 空気中の水および二酸化炭素を吸収したリチウム複合酸化物の炭化水素系ガス放出特性, 日本金属学会第 173 回秋期講演大会, Sept. 19-22, 2023.

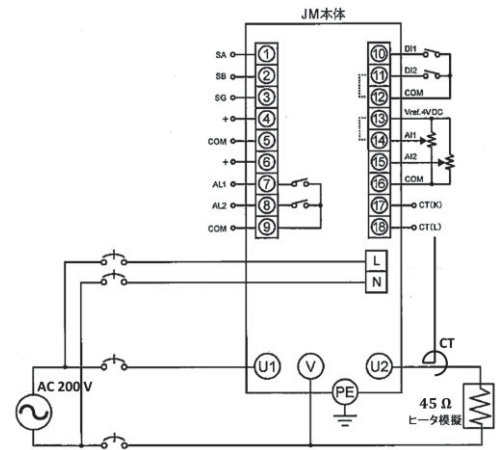


図 1. サイリスタレギュレータ結線図.

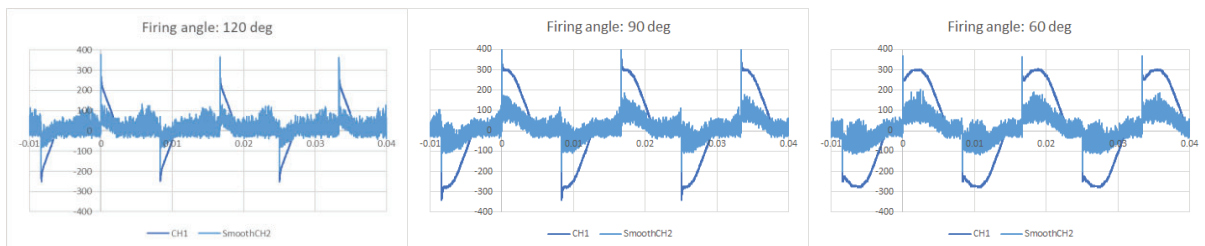


図 2. サイリスタレギュレータにおける出力電圧波形および出力電流波形.

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。磁場閉じ込め装置の一つであるトカマクにおいては、MHD 不安定性であるテアリングモードやバルーニングモードの発達によってプラズマの性能が大きく変化する。特に、バルーニングモードの線形安定性や非線形発達を理解することは、トカマクプラズマにおける周辺輸送を制御する上で重要な研究課題である。近年のシミュレーション研究において、トカマクプラズマの周辺領域におけるポロイダルシアフローがバルーニングモードの乱流の発達と大域的な熱輸送に影響を与えていることが指摘されている。

MHD 不安定性の線形安定性解析や非線形シミュレーションするために伝統的に用いられてきた手法が簡約化 MHD モデルである。簡約化 MHD モデルは、逆アスペクト比を用いたオーダリングを用いることで数学的に扱いやすく、数値的に安定にシミュレーションすることを可能とするものである。昨年までの共同研究において、抵抗性バルーニングモードの非線形発達を調べることができるシミュレーションコードの開発を行った。今年度はこのコードを用いて、ポロイダルシアフローがどのような物理課程を通してバルーニングモードの乱流の発達と大域的な熱輸送に影響を与えているかを調べることを目的とした。

【研究方法】

シミュレーションモデルとして、磁化プラズマを記述する簡約化 MHD モデルを用いる。簡約化 MHD モデルは、渦度方程式、一般化されたオームの法則、圧力の発展方程式によって構成される。渦度、ベクトルポテンシャルの磁力線に平行な方向の成分、電子圧力が未知数であり、流れ関数と電流の磁力線方向の成分は渦度の定義式 (ポアソン方程式) とアンペールの法則によって定まる。Hazzeltine(1985)の簡約化 MHD モデルを参考に、オーダリング上は落とされるべきであるが、エネルギー保存を保証する上で残す必要がある高次の項が圧力の発展方程式に残されている。本研究においては、ポロイダルシアフローを実装するために平衡の静電ポテンシャルを導入した。

コードの概要は以下である。各変数はポロイダル方向とトロイダル方向に複素フーリエ級数展開されており、振幅は時間と小半径方向の位置のみの関数である。複素フーリエ級数展開されたモデル方程式に対して、小半径方向の微分を有限差分法で処理し、時間微分項にルンゲクッタ法を適用する。ポアソン方程式を LU 分解を用いた手法によって解く。非線形項の計算においては擬スペクトル法を適用して実空間において評価する。実空間と波数空間の変換においては FFT を用いる。

【研究結果】

図 1 に、圧力と安全係数および平衡のポロイダルシアフローの小半径方向分布、それらの分布を用いた場合のバルーニングモード乱流の発達に伴う蓄積エネルギーの損失率の時間発展を示す。シアフローの絶対値が大きくなるにつれて、蓄積エネルギーの損失が低減されることが分かる。蓄積エネルギーの損失の低減は、バルーニングモード乱流の第一の飽和領域 (時刻 200 付近) および、その後の非線形発達 (時刻 300 以降) の両方において生じる。

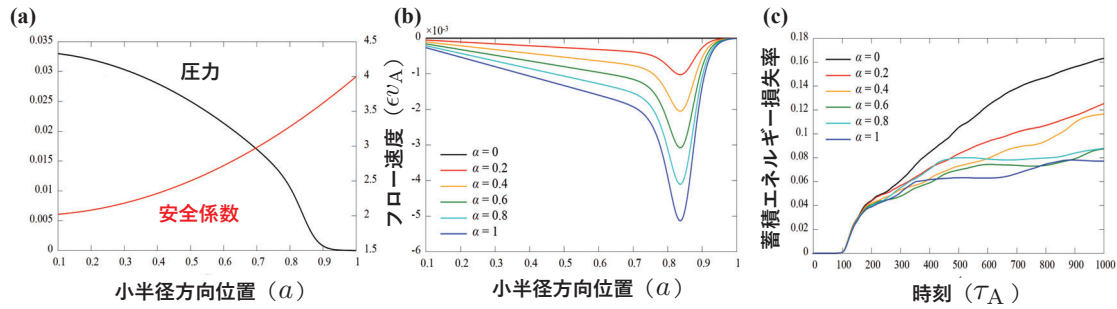


図 1 (a) 圧力と安全係数の小半径方向分布、(b) 平衡のポロイダルシアフローの小半径方向分布、(c) 蓄積エネルギー損失率の時間発展

図 2 にポロイダル断面における圧力揺動の時間発展のカラーコンターを示す。シアフローが存在しない場合は、コア領域まで圧力揺動が広がっていることが分かる(図 2(a))。このとき、コア領域に広がるストリーマ状の構造は、バルーニング乱流におけるモード間の非線形結合によって生じるものである。一方で、強いシアフローが存在する場合には、このような構造は卓越せず、圧力揺動の径方向内側への広がりが抑制されていることが分かる(図 2(b))。

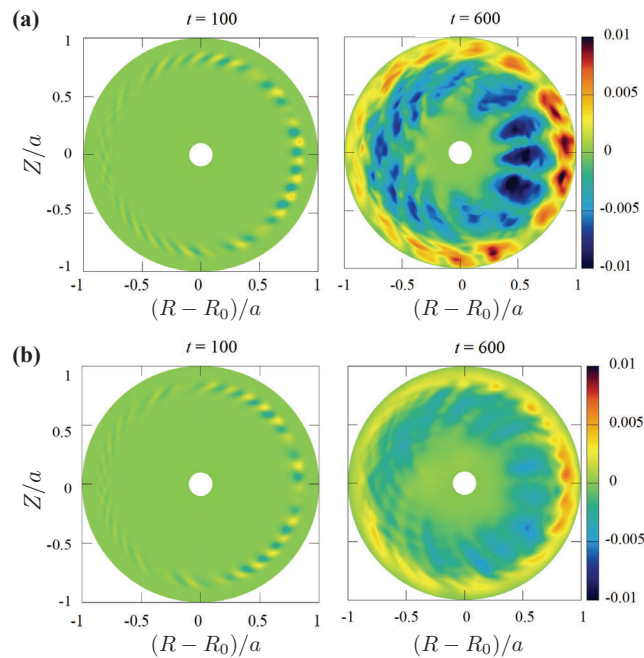


図 2 圧力揺動のポロイダル断面のカラーコンター: (a) シアフローが存在しない場合 ($\alpha=0$)、(b) 強いシアフローが存在する場合 ($\alpha=1$)

以上の結果から、周辺のポロイダルシアフローは、バルーニングモード乱流の第一非線形飽和領域においては局所的な閉じ込め改善に寄与し、さらに引き続く非線形発展においてはコア領域に向かう乱流広がりを抑制することで大域的な閉じ込め改善にも寄与することが明らかになった。

【まとめ】

簡約化 MHD モデルを用いたバルーニングモードの非線形シミュレーションを行い、ポロイダルシアフローがコア領域に向かう乱流広がりを抑制することを明らかにした。より現実的なポロイダル形状やパラメータを扱うことができるようにコードを拡張することが今後の課題である。

高エネルギーイオン照射法を用いた新奇二次元層状物質の創製

量子科学技術研究開発機構 高崎量子応用研究所 圓谷 志郎

1. 目的

グラフェンや六方晶窒化ホウ素 (*h*-BN) などの軽元素からなる二次元層状物質は、高い放射線透過性を有することから、耐放射線材料としての応用が期待されているが、種々の放射線および粒子線照射による構造への影響等、詳細な研究は行われていない。研究代表者らは、二次元層状物質とヘテロ原子との接合領域に高エネルギーイオンを照射することによるヘテロ原子のドーピング法を探索している[1,2]。同方法では、電子励起相互作用が支配的なエネルギー領域(数 MeV)のイオンビームをヘテロ原子と二次元層状物質の界面等の接合領域に照射することで、電子励起後の緩和過程で空間的に近接し同様に励起状態にあるヘテロ原子との間で結合の組み換え(置換)を生じさせ化合物を作製する。本研究では、グラフェンの表面への気体分子の吸着や、グラフェンの表面を異種原子の薄膜で被覆することでグラフェンと異種原子との界面を作製し、同界面に高エネルギーイオンを照射することでグラフェンに種々の異種原子をドーピングした。本報告書ではグラフェンへの塩素のドーピングの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力学研究所および高崎量子応用研究所のタンデム加速器を用いた。グラフェンの電子状態や原子構造はX線光電子分光(XPS), X線吸収分光(XAFS), 顕微ラマン分光や第一原理計算により評価した。

3. 結果および考察

図1にイオン照射後のKCl/グラフェン(照射後にKCl層は除去)のC 1sおよびCl 1s XPSスペクトルを示す。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。Cl K端XAFSの結果もあわせて考えると、高エネルギーイオン照射によってC-Cl結合が形成され、連続膜の塩化グラフェンを作製することができたといえる。

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の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や*h*-BN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, 滝沢優, 本田充紀, 水口将輝, 渡邊英雄, 大島武, 好田誠, 「重イオンビームからのエネルギー付与を利用した新規二次元物質の創製」, 第33回日本MRS年次大会, 2023年11月。
- 2) 圓谷志郎, 滝沢優, 本田充紀, 茂木俊憲, 水口将輝, 渡邊英雄, 大島武, 好田誠, 「イオンビームのエネルギー付与を利用した二次元新材料の創出」, QST高崎サイエンスフェスタ2023, 2023年12月。
- 3) 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薄膜への塩素ドーピング」, 2023年度量子ビームサイエンスフェスタ, 2023年3月。

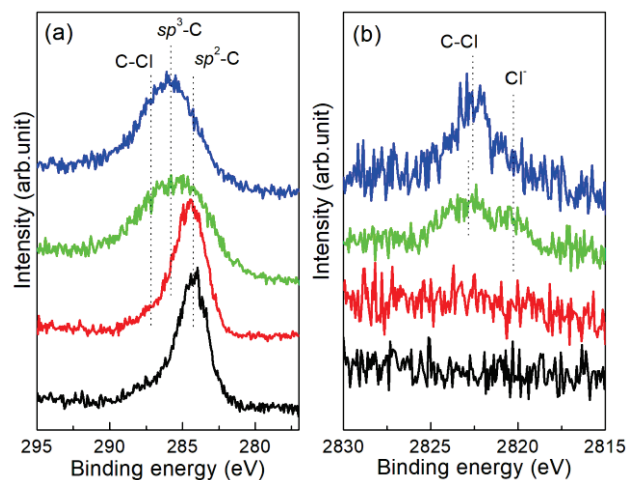


図1 イオン照射によるグラフェンの(a) C 1s, (b) Cl 1s XPS スペクトルの変化。

宇宙線ミュオンを用いた磁場のイメージング (Magic- μ) QUEST 磁場を通過した宇宙線ミュオンフラクスマップの計測

九州大学総合理工学研究院 金 政浩

背景

宇宙から飛来する高エネルギー素粒子である「宇宙線ミュオン」は、近年その高い透過能力と直進性を活用した巨大構造物の透視「ミュオグラフィ」に利用されている。本研究ではミュオンが荷電粒子であることにも着目し、磁場による偏向を検出して空間中の巨大磁場のイメージング技術の開発に取り組んでいる。この技術は、将来的に核融合炉の超伝導磁場の健全性の長期的なモニタリングに活用できる可能性がある。当研究グループはこの技術の実用性について、シミュレーションを軸にエビデンスを重ねてきた。その結果テスラオーダーの磁束密度をもつ対象は、短期間で磁場領域を描き出すことができることがわかったため、次のステップとして大型施設特有のノイズや振動のある現実的な場面で計測下限を見出すことが重要となってきた。そこで本研究では現実的な場の例として、QUEST の作り出す磁場を通過した宇宙線ミュオンの測定を可能とし、当技術の計測下限を推定する技術開発を行うことを目的とした。

計測原理

ミュオンは荷電粒子であるため、Fig. 1 に示すようにに磁場中を飛行するとラーモア半径を持った円運動をはじめめる。Z 軸負の方向にミュオン検出器を設置している場合、主にラーモア半径よりも十分厚い磁場領域の影響で、宇宙線ミュオンが遮蔽され、計数が減少する。環境中の宇宙線ミュオンのエネルギー分布は極めて安定しているため、磁束密度が高いほどラーモア半径は大きくなり、より高いエネルギーのミュオンまで磁場に遮蔽される。つまり磁束密度に応じた計数マップが得られる。これにより空間中の磁場分布が推定できる。

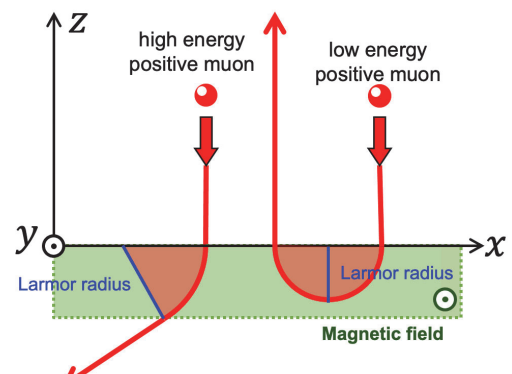


Fig. 1 宇宙線ミュオンの磁場による偏向

プロトタイプ宇宙線ミュオグラフィ検出器

当研究室で製作したプロトタイプミュオグラフィ検出器の心臓部は2つのミュオン位置検出器で構成されている。この2つの検出器をミュオンが位置からその飛来方向を推定できるようになっている。長時間計測の結果より、方向毎に単位時間あたりのミュオン飛来数であり、データ収集系としてNIM規格で作られた easiroc module (販売 GND 社)を用いている。NIM規格では、ビン電源をAC電源に接続し、6,-6, 12,-12,24,-24VのDC電源を供給している。また検出器には温度依存性があるため、ペルチェ型の温調器で内部温度を一定に保つようになっている。今回の報告では、これらふたつの電源装置が建屋電源から

供給される形となっている部分に注目のこと。

ノイズ耐性のある計測システムへの改良

検出器の設置位置・環境について検討した。候補として挙げたのはいずれもコア近くでの観測ができる場所的には良い地点だったが、同時にコア付近ということ QUEST やその付帯設備からの強力なノイズが懸念されたので、本年度はそれに対処したシステムに改良した。ノイズ対策としてはノイズ源を抑える方法ではなく、検出器自体を完全に電氣的に絶縁して、コモンモードノイズが乗らない系を考えた。

先述の建屋電源からの電源取得を遮断するため、データ収集系は東大島添研が開発している PET スキャン装置のデータ収集ボードを適用した。東大の PET スキャンは、計測の対象は異なるものの、シンチレータの光を微弱光検出器で測定するという、同様のセンサーシステムを用いているため適用可能となっている。また、AD 変換には **time-over-threshold** 法を用いており、極めてダイナミックレンジの広い計測が可能となっている。東大ではこのデータ収集ボードの電源として安定化電源を 3 台用いているが、今回は建屋電源からも遮断するため、Fig.2 に示すモバイルバッテリーで駆動可能な三端子レギュレータによる自作システムを整備した。

さらにフロントエンド PC としてラップトップを用意していたが、これも建屋電源を使用せずモバイルバッテリーで駆動可能な Raspberry Pi 400 (Fig. 3)を整備し、スタンドアロンで計測可能なシステムとした。

また検出器の温度依存性の対策としてペルチェ型の温度調節機構を廃止するため、新たに温度によるゲイン変動をモニタリング可能な手法を検討した。一般的によく用いられるのが温度補償機能と呼ばれるもので、事前に温度とゲインの関係を調べておき、計測中は気温に応じて検出器の印加電圧をリアルタイムに変化させてゲイン変動を抑える機構である。この機構は印加電圧の変更に伴う暗電流の変化が起こるため、ノイズレベルに近い波高のミュオンイベントを観測するときはネックとなる。そこで、現在、光センサ部に定期的に LED で一定の光量を与えて、計測スペクトル上でその LED によるピークがどこにあるかで現在のゲインを推定し、解析時にゲインが一定になるように時系列のリストデータを補正することで、ゲイン変動を抑える。この点は、この概念決定までを今年度実施し、来年度以降はまずはモックアップを用いた試験を通してゲイン変動を実際に抑えられるか確かめていく。なお、LED ドライバーも自作のものを用意して、モバイルバッテリーから電源供給できるようにする。



Fig. 2 データ収集系のボードに電源を供給可能な自作電源



Fig. 3 キーボードと一体になった Raspberry Pi 400

トモグラフィ計測を用いた磁化プラズマ乱流の同定および競合状態の観測

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性質の異なる磁化プラズマ乱流の競合状態の観測を行った。近年のシミュレーション研究から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))。これらの結果は、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する必要があることを示唆している。実際に、申請者が行ってきたトモグラフィ計測においてもプラズマ中心部と周辺部で性質の異なる揺動が存在することが確認できている(K. Yamasaki, Global Plasma Forum 2023)。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。

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が観測された。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 $m=1$ 揺動は時間的に振幅が増減したり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。また $m=1$ 揺動の振幅はプラズマ中心部から周辺部に伝搬している様子や、それに伴い $m=4$ 揺動の振幅が減少する様子も確認できた。

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。Structure function を用いて各揺動の空間構造安定性を解析したところ、 $m=3, 4, 5$ の揺動はプラズマ中心部から周辺部にかけて構造が安定していることが明らかになった。一方で $m=1$ 揺動は $r=2$ cm 付近を境にコヒーレンスが急激に低下する傾向があることが明らかになった。この結果は、 $m=1$ 揺動と $m=3, 4, 5$ 揺動が示す空間構造の時間発展が大きく異なることを定量的に示している。また modal coupling function も $r=2$ cm 付近で低下していることが判明した。これらの結果は、プラズマ中心部と周辺部で揺動同士が示す非線形結合現象が $m=1$ 揺動の時空間発展に支配されていることを示唆している。

$M=1$ 揺動の時空間発展と非線形結合の変化の関係性を明らかにするために、 $m=1$ 揺動の振幅変化が $r=2$ cm に到達する時間を基準として structure function および modal coupling function の時空間発展を計算した。解析の結果、 $m=1$ 揺動の振幅が強い領域が径方向に伝搬する時間帯に合わせて $m=1$ 揺動の空間構造の安定性が増加し、さらに非線形結合が強い領域が径方向に伝播していることが明らかになった。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ると考え、現在論文投稿の準備を進めている。

超臨界 CO₂-金属界面での物質移動現象に関する研究

九州大学大学院総合理工学研究院 片山一成

【緒言】

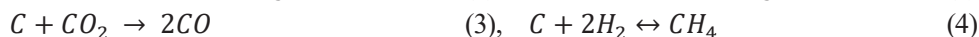
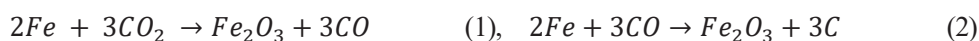
エネルギー資源の効率的利用の観点から、高効率な発電システムの開発が求められている。CO₂は温度31°C、圧力7.4 MPaという常温に近い温度領域に臨界点を有し、超臨界状態では、気体と液体の中間的な性質をもつ超臨界流体として振舞う。超臨界CO₂の圧縮率係数は比較的小さいことから、ガスタービンシステムを構成する圧縮機を臨界点付近で運転することにより、圧縮に必要な動力を大幅に低減できる。そのため、超臨界CO₂ガスタービン発電は、従来のガスタービン発電に比べて、高い発電効率を得ることが可能である。高温下で稼働させる発電システムを長期間安全に運転するためには、作動流体と構造材料との相互作用を理解しておくことが重要となる。しかしながら、超臨界CO₂と金属界面における化学反応・物質移動に関する知見は十分ではない。CO₂と金属界面での化学反応・物質移動は、構造材料の酸化腐食や不純物ガスの発生を生じさせる可能性があることから、長期運転時の構造材料の健全性評価や、作動流体精製プロセスの設計を行う上で、その理解を深める必要がある。本研究では、超臨界CO₂と金属との反応により生じる気体状生成物の発生機構の解明を目的とした基礎実験を行った。ここでは、超臨界CO₂循環ループを構成する配管材料から放出される不純物水素が混入する状況を想定した実験を行った。

【実験方法】

実験装置の概略図を Fig.1 に示す。H₂/CO₂ 混合ガス(H₂:1017ppm, CO₂:balance)とCO₂ガスを混合し、任意の水素濃度を有するCO₂ガスを試料管(SUS316, 長さ:300mm, 外径 19.05mm, 厚さ 1.24mm)に封入した。管外部に巻き付けたリボンヒーターで400°Cまで加熱することによって11.0 MPa程度に圧力を上昇させ、超臨界状態とした。温度制御は、管中央に挿入したInconel被覆熱電対で行った。試料管下部に2つのバルブを設置し、30分おきに上部バルブを開閉して気体の一部をバルブ間の空間にサンプリングした。下部バルブを開放し、サンプリングしたガスを低流量でガスクロマトグラフ(GC:島津製作所製 Tracera)に供給し、気体状生成物濃度を測定した。

【結果及び考察】

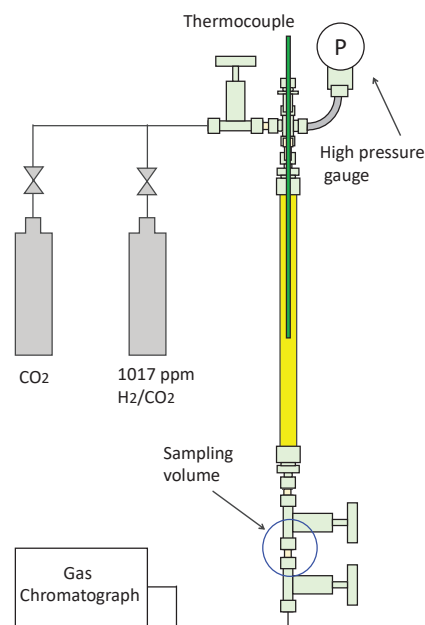
400°Cに加熱した超臨界CO₂中には、事前にCO₂とともに封入したH₂に加え、気体状生成物としてCOとCH₄が検出された。どちらの成分も加熱保持時間とともに緩やかに増加した。COは、金属表面でのCO₂の還元反応に伴い生じていると考えられる。またCH₄は、金属表面の酸化反応によって析出したCと封入したH₂との反応によって生成されたと考えられる。CO₂-SUS316界面で生じると考えられる化学反応を以下に示す。1



COとCH₄の生成機構は次のように考えられる。まず、SUS316表面酸化膜を拡散したFeが気相との界面に到達すると、CO₂と反応してFe₂O₃が形成されるとともにCOが発生する。Feは発生したCOとも反応して、Fe₂O₃が形成され、SUS316表面にCが析出される。CはCO₂と反応してCOを生じる。気相中にH₂が存在する場合は、析出したCと反応してCH₄が生じる。超臨界CO₂を用いた冷却系では、配管材料から放出される不純物水素と、CO₂による酸化反応に伴って析出するCとの反応によりCH₄が生成し得る。CO₂純化系には、CO除去系に加えて、CH₄除去系を備える必要があると考える。超臨界CO₂冷却系を核分裂炉や核融合炉[1]に適用する場合は、炉心から移行してくるトリチウムと析出炭素との反応によってトリチウム化炭化水素が形成される可能性があり、安全上の配慮を必要とする。

参考文献

[1] S. Ishiyama et al., Fusion Science and Technology, 75 (2019) 862-872.

Fig.1 超臨界CO₂実験装置概略図

軸対称トカマクにおける重イオンビームプローブ計測器の揺動計測 のための最適化研究

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。この特性から、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できる。更に、最近では様々なトーラス磁場装置において層状流やストリーマ等、メソスケールの構造形成に伴って発生する電位を計測しており、HIBP は閉じ込め物理の研究において非常に有用な計測ツールとなっている。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。本研究の目的は、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 比を改善する。その後 PLATO 装置における HIBP を用いてプラズマ中の局所乱流揺動を計測し、更に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い、PLATO 装置への入射テストを実施している。プローブビームを真空容器上側のポートから入射し、入射角をスキャンして、真空容器下側に設置した一次ビーム検出器で、一次ビームを測定した。入射角スキャンに同期した信号が得られ、設計通りのビーム軌道が実現されて、一次ビームが観測されている。二次ビームについて、更に校正実験を進めると共に、イオン源開発を継続し S/N 比改善を目指す。

多チャンネル放射光計測によるトモグラフィーについては、計測機器の準備を進めると共に、解析手法について検討を進めている。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。PLATO 装置においては、あるポロイダル断面で多視線放射光計測を実施し、この2次元平面における発光分布を変換によって得る。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ーの解析手法の検討、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。直線装置 PANTA へ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。

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、カオス的振る舞いや乱流といった乱れた挙動が観測される。直線装置 PANTA (九州大学応用力学研究所) においてもドリフト波を代表する様々な揺動や帯状流などの非線形構造が励起されている。特に非線形構造の制御は核融合炉心プラズマの性能向上に不可欠であり、そ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、昨年度開発したプラズマカオス発生装置を用いたフィードバック制御実験を行い、カオス状態を定量化するための解析手法の開発を行った。

結果

本年度は、直流放電装置を用いてカオス状態のプラズマへの磁場印加実験を行った。図1に印加磁場の周波数を変化させたときの周波数スペクトルを示す。印加磁場にプラズマが応答している様子が見て取れる。また、電離波動の基本周波数と印加磁場の周波数が近い場合に基本周波数のずれが生じる傾向が見られる。初期的な実験ではあるが、カオス状態をコントロールする制御の部として磁場が有

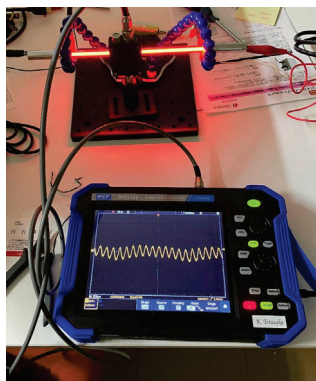
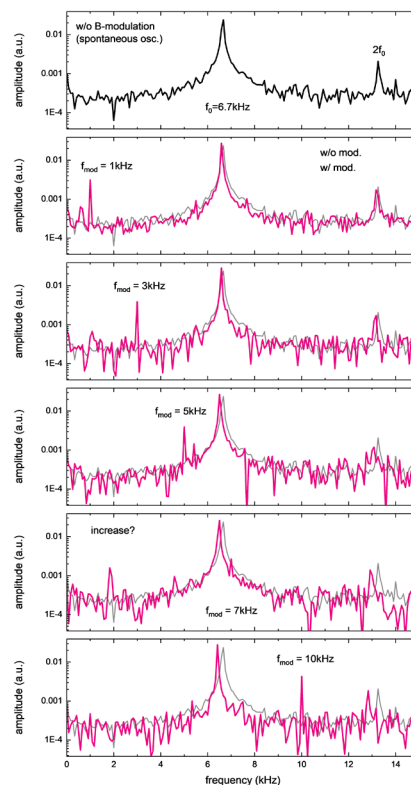


図 1. 本共同研究で製作したデスクトップサイズのプラズマカオス制御実験用直流プラズマ発生装置(左上). 直流プラズマに交流磁場を印加したときのプラズマ自発光の周波数スペクトル(右).



効な候補であることを示唆している。昨年度までは、放電電流を計測し、放電電流そのものにフィードバックをかけることで、カオス状態の制御を行っていた。本年度の結果は、カオス制御に用いる参照信号に柔軟性があることを意味し、プラズマの制御の部として様々なパラメーターを選択できる可能性を実験的に確認できたと考えている。

上記の実験と並行し、従来の放電電流に対するフィードバックシステムを用いた装置でも制御実験を実施した。フィードバック信号の条件を詳細に調べることで、図2に示す間欠的なカオス状態の発生など新しい知見を得ることができた。この結果については Plasma Fusion Res. 誌や学会において報告済みである。

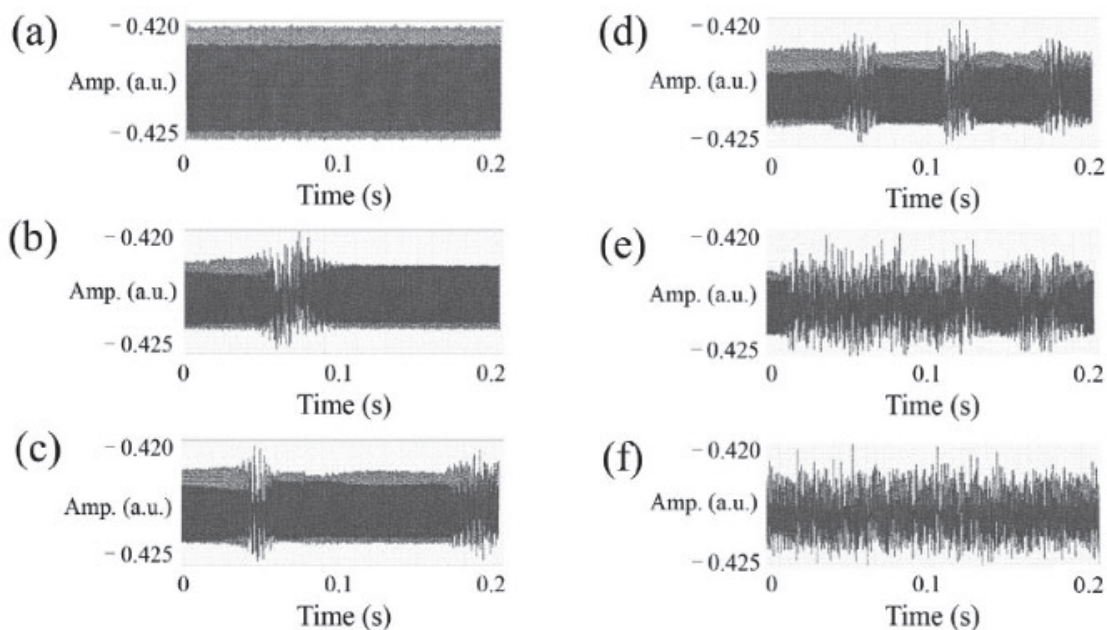


図 2. 直流プラズマ(Ne)の自発光の時系列データ(T. Fukuyama et al., PFR 2023[1], Fig. 3 より抜粋). 左(a)は非フィードバック時 (非カオス状態). (b)-(d)は Pyragas 方式のフィードバック信号の振幅が特定のウィンドウ内にある場合に発生する間欠カオス (e), (f)はフィードバック信号の振幅を大きくした場合に生じる強いカオス状態. 文献[3]ではリカレンスプロットを用いた解析など、カオスの特徴について詳細を議論している。

まとめと今後の展望

本年度は、実際のカオス発生装置を用いて制御に向けた具体的な実験を実施することができた。カオス制御研究について実験データが蓄積されつつある状況にあったが、研究代表者の異動に伴う実験装置移転の関係で十分なマシンタイムを確保できなかった点が心残りである。今後は磁場を用いたフィードバック制御システムの構築や情報エントロピーを用いた時系列解析 (CH解析) を用いたカオス状態の定量化について研究を進め、プラズマ制御の高度化を図る予定である。

[1] T. Fukuyama *et al.*, Plasma Fusion Res. **18**, 1401088 (2023).

磁化プラズマ中における磁力線並行・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

磁化プラズマ中では磁力線に対して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})が定義できる。磁場閉じ込め核融合炉の SOL・ダイバータ領域では2つのイオン温度が異なる値を持つと予想されており、 T_{\parallel} と T_{\perp} を計測する必要がある。しかしそれぞれ独立した計測システムを要するためポート数に限りのある環状閉じ込め装置で2方向のイオン温度を計測する事は容易ではない。本研究では T_{\parallel} の計測を目的として開発された Retarding field analyzer (RFA)の速度選択性に着目し、単一の計測器・単一の放電から2方向のイオン温度を導き出す手法を開発する事を目指す。

2. 成果

我々の提案する手法では RFA により実験的に取得した電流-電圧特性(I - V 特性)と速度選択性を考慮した計算により得られた I - V 特性とを比較する事によって T_{\parallel} と T_{\perp} を導き出す。計算ではその目処が得られていたものの、実験的な検証はこれまで行われていなかった。そこで本年度はその検証を目的とした実験を実施した。実験は東北大学の DT-ALPHA 装置にて行なった。

DT-ALPHA で電子密度が $5 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$ 程度の希薄なヘリウムプラズマを生成し RFA と ISP^{※1}の計測を行なった。RFA で実験的に取得した I - V 特性と計算とを比較すると、 $T_{\parallel}=1.2 \text{ eV}$ および $T_{\perp}=2.1 \text{ eV}$ が得られた。この T_{\perp} の妥当性を検証するため、同じ放電条件下で ISP による計測を実施した。ISP で得られた I - V 特性を解析すると 2.0 eV となり、RFA で得られた T_{\perp} と良い一致を示した。初期結果ではあるものの、我々の提案する手法に対して一定の妥当性を与えるものである。現在この成果を纏めた論文を投稿中である。高密度なプラズマへの適用可能性を調べるために異なる放電条件で同様の実験を試みた。しかしプラズマ密度が増加するにつれ RFA の I - V 特性が空間電荷効果に支配される傾向が確認された。空間電荷効果は RFA 内に多量のイオンが蓄積する事により発生する。そこで RFA の運転領域を拡大すべく小型 RFA の設計を行なった。現在は小型 RFA の組み立てを進めている。これまで運用してきた RFA と比べて口径が 1/2 となるため、より高密度条件での計測が期待できる。 ※1 Ion sensitive probe. 垂直方向イオン温度を計測するための機器である。

3. 成果報告

- ① 加賀谷重考 他, 「Retarding Field Analyzer におけるイオン選択性を用いた磁力線垂直方向イオン温度計測手法の検証, プラズマ・核融合学会第 40 回年会, ポスター番号 30P60
- ② 加賀谷重考 他, 「Retarding Field Analyzer における速度選択性を利用した2方向イオン温度の同時計測手法の構築」, 日本物理学会 2024 年春季大会, 講演番号 18aB1-11

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

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材料の一つに Fe-Cr 及び Fe-Cr-Ni 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。他方、プラズマ消失時に発生する電磁力の計算で磁気特性が必要であり、構造体の磁性に与える過酷照射の影響の理解が必要であるが、ほとんど分かっていない。我々の研究グループでは先行研究として、bcc 構造の Fe-18Cr-8Ni 薄膜を He イオンで過酷照射することで、キャビティが形成し磁化曲線の形状が変わることを見出しているが[1]、Ni の役割は不明であった。本研究では、相境界組成を含む Fe-Ni 薄膜に対して He イオン照射を行い、その結晶構造と磁性に与える過酷照射の影響を調べた。

実験方法: 超高真空電子ビーム蒸着法を用い、MgO(001)基板上に膜厚 200 nm の Fe-Ni 合金薄膜 (Ni 組成: 15, 24, 36%) を作製し、30keV で He⁺を室温照射した。損傷量と残留 He 分布を SRIM 計算から推定した結果、最大弾き出し損傷量は 19 dpa で、He は薄膜内に残留することを確認した。照射前後の結晶構造・磁性を EBSD、XRD、TEM、VSM で評価した。

結果及び考察: EBSD 観察の結果、MgO(001)基板上に 15Ni では主に bcc 構造が、24Ni では bcc と fcc 構造が、36Ni では主に fcc 構造が成長していることを確認した。結晶構造と方位の照射による変化は見られなかった。XRD 測定の結果、全ての試料で照射量増加に伴いピーク位置が低角側にシフトし、膜面垂直方向に膨張した。また、照射後の断面 TEM 観察から、照射により高密度のキャビティが形成していることを確認した。VSM による磁化測定の結果、bcc 構造の 15Ni 薄膜では照射による磁化曲線の形状に変化は見られなかった。この結果は bcc 構造の Fe-20Cr や Fe-18Cr-8Ni 薄膜の結果[1]とは異なる。これらの結果は、照射による bcc 構造の Fe-Cr-Ni 合金の照射による磁気特性変化において、Ni の寄与は小さく、Cr が重要な役割を持つことを示している。それに対して、24Ni、36Ni では 15Ni と異なり、照射により飽和磁化が減少した。24Ni、36Ni の照射前試料は少量の bcc 構造を含むと考えられ、その磁化の大きな bcc 構造の領域の一部が、照射により磁化の小さな fcc 構造に変態した可能性が考えられる。薄膜表面の EBSD 観察と XRD 測定からは直接確認できなかったが、断面試料の透過 EBSD による高分解能観察で、照射前とは方位の異なる fcc 構造の形成を確認しており、照射による結晶構造の変化を示唆している。本研究より、bcc 相と fcc 相とで Fe-Ni 合金の磁性に与える照射影響が異なることがわかり、実用 Fe-Cr-Ni 合金の磁性の照射影響を考える上で有用な情報を得ることができた。

文献: 1 畠山将人ら, 第 173 回金属学会講演大会概要集(2023)

成果報告:

Y. Kamada *et al.*, "Irradiation Effects on Structure and Magnetism of Fe-Cr-Ni Alloys at the fcc-bcc Phase Boundary", "Effects of Helium-Ion Irradiation on Magnetism of Pure Iron and Iron-Chromium Alloy", ICFRM-21, Granada, Spain, Oct. 2023 (2 件)

Y. Kamada *et al.*, "Microstructure and Magnetism of Heavily Helium-Ion Irradiated Epitaxial Iron Films", *Metals*, 13, (2023) 1905.

組織: 鎌田康寛, 清水一行, 村上武, 畠山将人, 梅山大輝, 久慈聖太: 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、関連計測装置の準備と新規な方法の調査・提案をした。

3. 研究成果

3-1 基本設備の更新 研究計画全体の遂行のために必要なパソコン関連一式設備を見直し、基本情報処理用 PC 等を追加購入設置した。すなわち、近く（2025 年夏頃）、MS 系の公式 OS サポートが Windows10 から Windows11 に切り替わるので、サポート以後の安全確保のために、対応可能な新しい PC 等に更新した。但し、各個システム稼働のためのソフトウェアが Win10 対応以前のものについては、同ソフトウェア稼働時には、外部ネットワーク接続なしで稼働するように、注意している。

3-2 変位計測システムの追加整備可能性の検討 マルチカラー同軸変位計 1 式のうち、昨年度までに完了していなかった、より遠距離配置の真空或いは指定雰囲気中の対象物測定のために、より遠距離測定可能な変位計システムの検討をした。損耗量のその場測定の実用範囲を広げるために必要であったが、変位計ヘッドを入れ替えるだけでなく、ヘッドをバックアップする部品系 1 式（コントローラ、増設ユニット等）も追加調達する必要があることが判明したので、本年度は、準備のための小実験をするにとどめた。たとえば、これまでに用意した古い真空蒸着装置のベルジャー部と同一種類のガラス板の背後に被検材を置いて、被検材厚さ測定ができるかどうかを調べた。

3-3 レーザー励起超音波厚さ測定装置の最近の製品調査 これまでに使用の当該厚さ測定装置の装置価格は必ずしも安価ではなく、その応用範囲をさらに広げるためには、より小型化、低価格化を実現する必要がある。そこで、さらなる調査を実施した。その結果、非接触レーザー超音波可視化検査装置なる製品名で、つくばテクノロジー（株）からカタログ販売されているものがあり、現在、同社に連絡し、本研究目的をカバーでき、かつ、さらなる広範囲への応用が可能で、かなり安価で小型の新製品開発の可能性検討を開始した。

3-4 アップコンバージョン（UC）光を利用する複合分光法の準備 構造材料本体背面或いは、これの背後に置いた高温用透明材料との組み合わせ材料に、UC 材料の薄層を加えたサンプルを作成し、これらの高速温度上昇時の分光測定を計画した。

4. 謝辞 本研究は、九州大学応用力学研究所と東京工業大学・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}, ^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 . (2024/02/15 記)

6. 研究成果報告一覧 最近の当該共同研究結果を、下記の論文などで公表或いは公表

- 1) 糟谷紘一, コチャエフ・オルグ, 井澤靖和, 徳永和俊, 川路 均, 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, 九州大学応用力学研究所共同利用研究成果報告, 26, 1, 158-159, 2023.
- 2) 糟谷紘一グループ, 種々の先進材料の高密度エネルギー計測分野への応用, 東京工業大学・技術創成研究院・フロンティア材料研究所共同利用研究報告書, 27, 1, 93-95, 2023.
- 3) 糟谷紘一, 徳永和俊, 川路 均, 平等拓範, 核融合材料の損耗過程の・その場測定法に関する最近の試み, 2023年度NIFS共同研究夏の合同研究会, 筑波大学総合研究棟 B112 講義室+オンライン, 2023年9月5日-9月6日.
- 4) 糟谷紘一グループ, レーザー照射に付随する検体の放射損傷の極小化とその医療診断への応用に向けて, 第1回医療フォトンクスシンポジウム~フォトンクスの医療応用を加速させるには~, 2024年3月13日14:00~20:00, 大阪大学銀杏会館3階, ポスター講演.

7. スピンオフ研究課題の提案

当該研究課題は、元々、核融合関連高温材料の研究のために進めてきたものである。特にごく最近、産官学全体の異常なまでの核融合炉開発付随研究の高まりがあって、根っからの核融合関連研究者にとっても、増々ありがたい環境になっている。但し、核融合発電実現が近づいたことの宣伝が嘘であったことが判明する場合、ごく近い将来か、もう少し先になるかは別として、世界の失望・反動は、計りしれなく深いものになるであろう。それでも、さらに引き続き核融合研究を続けるべきかと問われるなら、やはり地球上の生体のさらなる存続を望む限り、続けざるを得ないと答えるしか道はないであろう。

さらに続けて、本研究の代表者は以下のことを付記したい。元々核融合材料の損耗研究であった研究課題は、何もこれのみに限定されるべきものではなく、より生々しい生体防衛の観点からの、スピンオフ的研究課題へと敷衍する。すなわち、例えばレーザー光照射による生体診断・治療分野において、対象物に与える乱れ（よくない状態変化）を、可能な限り小さく抑えて診断・治療する方法の選択を可能とする進化した方法の提案を、能動的に展開したいと言うモチベーションの盛り上がりをもたらす。——という訳で、ごく最近、研究代表者らはスピンオフの1つの方向を模索するため、上記（6-4）項のシンポジウムに参加することにした。余命期間がより短い者にとって、こちらの課題の方が、短期間で寄与できることがより多くありそうである。

反転密度勾配が駆動するドリフト波による粒子ピンチ効果の理論シミュレーション研究

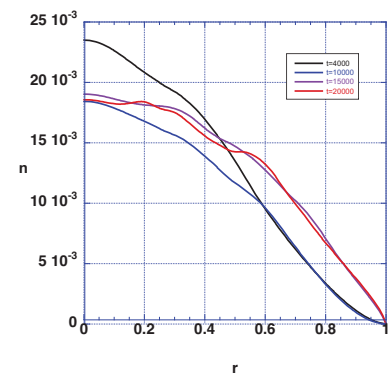
量子科学技術研究開発機構 矢木雅敏

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

昨年度は、R6F コード（1次元領域分割版）を用いて周辺部にハンプをもつ密度分布を初期値として与えた場合や放物線型の密度分布に対し、ある時刻において球状の粒子ソースを印可した場合等に関して報告したが[1-2]，本年度は、R6F2 コード（2次元領域分割版）にガウス型の加熱ソースと粒子ソースを実装し、コア部に加熱ソース、周辺部に粒子ソースを印可して分布の時間発展を解析した。ポロイダルアルフベン時間で規格化した時間において $t = 4000$ で加熱ソースを $r_0 = 0.2$ に印可しており（イオンと電子両方）、その後しばらく分布の発展をさせた後、 $t = 10000$ で粒子ソースを $r_0 = 0.8$ に印可し、密度分布の時間発展を追跡した。図に密度分布の時間発展を示す。加熱ソース印可後、密度分布はコア部が減少に転じていることがわかる。 $r = 0.6$ に $q = 2$ 面が存在し磁気島が形成されている。これが障壁となり $r = 0.6$ に境界が置かれているのと等価な振る舞いをしている。密度ソースの添加後、コア部の減少はとまり外側からの密度供給により徐々に回復している。この場合、 $r = 0.6$ を横切って密度が上昇していることから障壁としての効果は弱いようである。詳細な乱流揺動解析は次年度引き続き行う。さらに R6F コードの GPGPU への移植も進展した [3]。



図：密度分布の時間発展

[1] 宮本琉耶, 糟谷直宏, 矢木雅敏, “Evaluation of nonlinear mechanism to induce inward turbulent particle fluxes in tokamaks”, 第 21 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), 2023-12-22.

[2] 矢木雅敏, 令和 4 年度共同利用研究成果報告第 26 号, 2022CR-FP-3.

[3] 矢木雅敏, 轟晴彦, 糟谷直宏, “GPU acceleration of RMHD model and application to particle transport in plasma peripheral”, 第 21 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), 2023-12-21.

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)