

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 9 日現在

機関番号：24506

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420854

研究課題名(和文) パルス高熱負荷照射と磁場印加によるプラズマ対向材溶融層のダイナミクス研究

研究課題名(英文) Study on dynamics of W melt-layer splashing generated by a transient heat load simulator with a plasma gun in an external magnetic field

研究代表者

福本 直之 (Fukumoto, Naoyuki)

兵庫県立大学・工学研究科・准教授

研究者番号：90275305

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：磁化同軸プラズマガンを用いてプラズマを照射することで、核融合実験炉ITERにおいてプラズマ対向壁材料として選ばれたタングステン(W)に対して、パルス熱負荷を模擬した試験を行った。そして、磁場中において、熱負荷によるW板表面での溶融層の形成とダイナミクスについて調べた。高速カメラによる撮影で得られた画像を解析することで、溶融層からのドロップレット飛散量および飛行速度が、磁場印加により減少し、その飛散方向には偏りがあることを明らかにした。溶融層に表れる波紋の抑制も見出した。また、磁場印加の有無に関係なく、照射直後でもW板の表面温度はWの融点に近い3700Kであることも明らかにした。

研究成果の概要(英文)：A magnetized coaxial plasma gun was employed as a powerful transient heat load simulator for material damage tests required in ITER. The high pulsed heat flux can damage pure tungsten samples (W) leading to surface evaporation, cracking, melting, boiling and droplet splashing. The dynamics of W droplet motion was investigated under the externally applied magnetic field by using a high-speed camera. It is found that the magnetic field could decrease the droplet speed and suppress the droplet splashing as the field increases. The suppression efficiency might depend on the direction of the parallel magnetic field. The 2D surface temperature measurement also confirmed that the surface temperature reached up to 3700 K immediately after the plasma exposure.

研究分野：プラズマ工学、特に核融合分野における磁化同軸プラズマガンの開発および応用

キーワード：タングステン溶融層 磁化同軸プラズマガン プラズマ照射 プラズマ対向材 パルス熱負荷

1. 研究開始当初の背景

核融合炉の実現に向けては、高性能な炉心プラズマの生成維持は不可欠であるが、それと密接に関わるダイバータ板における熱・粒子流の制御、さらにダイバータ板などプラズマ対向材料の損耗・損傷の低減も重要な工学的課題とされている。特に間欠的なプラズマ流出を伴う Edge Localized Mode (ELM) 不安定性やプラズマディスラプションによるパルス的な熱・粒子負荷によるプラズマ対向材の溶融・損傷が懸念されている。国際熱核融合実験炉 (ITER) のダイバータ板材料には炭素繊維強化材 (CFC) およびタングステンが採用されているが、パルス熱・粒子負荷に対する健全性の検証が急務とされている。これまで国内外では、電子ビームやレーザーを材料に照射する熱負荷模擬実験が実施されてきたが、この方式では実際のようなプラズマ粒子としての負荷を与えることができない。そのため、欧州ではロシアのプラズマガンを用いたパルス熱・粒子照射実験を行い、そのデータを基に ITER の ELM 許容レベルが議論されている。国内においては、材料照射装置としてのプラズマガンが存在しなかったため、当該分野の研究進展に対して大きな障害になっていた。そこで、兵庫県立大学の当研究グループが開発研究してきた先進的燃料補給装置としてのプラズマガンの技術を転用することで、国内においても 2009 年度からプラズマガンを用いたパルス熱・粒子照射実験が開始された。これら以外にも、高温プラズマによる熱負荷の観点から、トカマク装置に加えて、近年ではミラー装置でも基礎的な材料の研究が行われている。

プラズマ対向材へのパルス熱・粒子負荷では、材料の溶融・損傷過程において蒸気遮蔽効果が重要な役割を果たすと考えられている。その効果については、プラズマガンを用いたパルス熱・粒子照射と電子ビーム照射による材料の溶融・損傷特性を比較することで議論がなされている。また、プラズマ対向材料の設置環境から、プラズマ閉じ込め磁場による材料溶融層の挙動への影響も考えられている。この溶融層の挙動については、TEXTOR トカマクにおいて、タングステン板をエッジプラズマに曝して秒単位の時間スケールで溶融させる実験で調べられている。そして、溶融層に電流が流入し、その電流と閉じ込め磁場による $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ の電磁力により溶融したタングステンが運動することが明らかとなった。ITER や原型炉では、この $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ 電磁力だけでなく、プラズマ圧力も無視できず、それらの力によって溶融層のダイナミクスが支配されると予想される。また、ELM やディスラプションのように溶融層がミリ秒オーダーで形成されプラズマ圧力も大きい現象では、プラズマ圧力による駆動力が支配的であると考えられている。

プラズマ対向材料については、ITER や原型炉に向けて、今後も実験室規模の装置にお

いて熱負荷特性試験やプラズマ照射試験による詳細な研究が求められている。

2. 研究の目的

磁化同軸プラズマガン (MCPG) を用いることで、短パルスのプラズマを照射することによりパルス熱・粒子負荷を実験室レベルで模擬し、プラズマ対向材の溶融・損傷を評価することが可能である。そこで、外部磁場を印加した状態で、MCPG 装置から射出される ELM 様の短パルスプラズマ塊や、プラズマフロー、中性ガスをプラズマ対向材料であるタングステン表面に照射することで、材料表面に生じる溶融層を観測する。これにより、磁場中でのタングステン表面におけるパルス高熱負荷照射による溶融層の形成とドロップレットの飛散などのダイナミクスを明らかにする。

3. 研究の方法

目的：

本研究では、当研究グループと核融合科学研究所とで先進的燃料補給装置として共同開発した高性能磁化同軸プラズマガン SPICA 装置を転用することで、プラズマ対向材料へ 80 μ s 程度の短パルスで $\sim 2\text{MJ}/\text{m}^2$ のプラズマを照射することによりパルス熱・粒子負荷を実験室レベルで模擬し、材料の溶融・損傷の評価する。ここでは、プラズマ対向材として ITER に採用されたタングステン板で評価を行った。そして、材料に磁場を印加し、そこに SPICA 装置から射出される ELM 様の短パルスプラズマ塊や、プラズマフロー、中性ガスを材料表面に照射する。それにより材料表面に生じる溶融層のダイナミクスを、高速カメラを用いて観測する。これにより、磁場中でのプラズマ対向材料であるタングステン表面における溶融層の形成とドロップレットの飛散などのダイナミクスを明らかにする。また、プラズマ照射による材料の損傷領域への熱負荷の入力や電流の流入を、カロリメータおよびログスキーコイルを用いて評価した。

4. 研究成果

(1) 本実験用に設計・製作したサンプルホルダーを用いて照射対象のタングステン (W) 板を固定し、SPICA 装置で水素ガスをを用いたコンパクト・トーラス (CT) プラズマを生成・加速し照射した。高速カメラの映像から、プラズマ照射により W 材料表面に溶融層が形成され、溶融層上の波紋と溶融層からのドロップレットの飛散を確認した (図 1)。この照射実験では、MCPG の内部電極先端 (SUS304) に放電電流が集中するため、電極自体もエロージョンを起こしやすい。そのため、電極先端の表面状態も変化した場合、先端表面自体の溶融か、材料表面の溶融層からの飛散物か、観測時点では判断が付きにくい。そこで、内

部電極先端の損耗や照射材料への汚染などを防ぐため、新たにモリブデンの内部電極先端部を製作した。SPICA 装置の材料照射装置としての性能を評価するため、熱入力計測として、カーボン製チップによるカロリメータも設計・製作した。形状の異なる先端チップを製作し、入力熱負荷の評価において、プラズマの回り込みによる影響の検証も行った。また、ロゴスキーコイルによるサンプル材料付近の電流計測により、熔融層形成において、加速された CT プラズマの材料への衝突による熱化以外に、CT プラズマやガン放電電流の材料表面への流れ込みによる影響を示唆する結果が得られた。そして、磁場中での熔融層の挙動を観測するために必要な磁場印加装置の簡易コイルと電源を整備し、磁場印加の予備実験を行った。その結果を基に、磁場印加装置等の改良を行った。

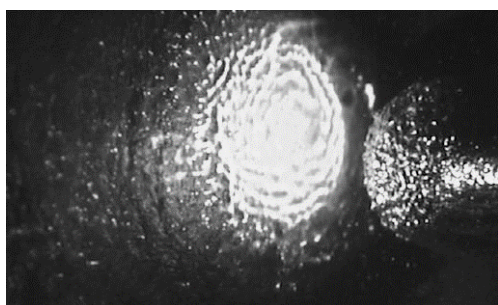


図 1 タングステン表面における熔融層の形成とドロップレットの飛散（放電開始後 600 μ s, 磁場無し）

(2) 改良した磁場印加装置等を用いて磁場中での W 材料へのプラズマ照射実験を行い、磁場印加強度およびタイミングを変化させて、タングステン (W) 板に形成される熔融層および飛散するドロップレットの様相を観測した。そして、磁場中では、形成された熔融層の挙動が抑制され、飛散するドロップレットが減少することが確認できた (図 2)。そのドロップレットの飛散量を、高速カメラによる撮影で得られた画像を前後時間でのフレームで差分を取り、それを二値化したデータから飛散 (移動) するドロップレットを抽出することで算出した。ドロップレット飛散量のデータから、磁場強度や方向に対する依存性を調べた。その結果、磁場の増加とともに、ドロップレットの飛散量が抑制されることが明らかとなった (図 3)。さらに、磁場の方向により、飛散方向に偏りがあることも明らかとなった。その偏りは、磁場が強いほど大きく現れた。また、解析プログラムの改良を行い、ドロップレットの画面上における粒径の違いによる飛散を調べた。小さい粒径の方が多く飛散していたが、粒径の違いによる磁場の影響の違いは見られなかった。

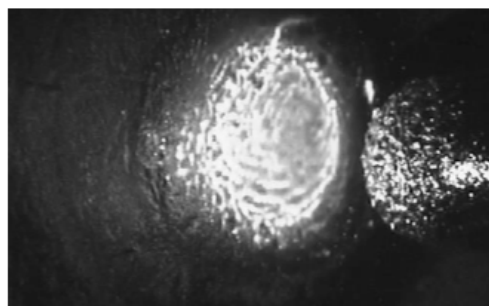


図 2 磁場中におけるタングステン表面における熔融層上の波紋およびドロップレットの飛散の抑制（放電開始後 600 μ s）

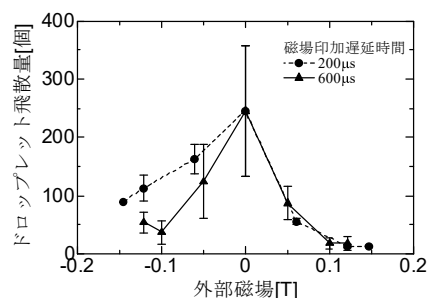


図 3 磁場中におけるドロップレット飛散の抑制

(3) プラズマ照射による熱負荷入力をより正確に評価するため、カロリメータのヘッドチップ部を改良し、計測を行った。大学での基礎実験の結果とも比較した結果、SPICA 装置 (バイアスコイル: 120A, ガン放電電圧: 14-16kV) の内部電極先端から 21mm 離れた位置では、0.1MJ/m² 程度のエネルギー密度の熱負荷となった。しかし、ヘッドチップ側面からの熱入力の影響により、過小評価の可能性が生じたため、カロリメータのヘッドチップ部の追加改良を行った。チップ材料は、材料の昇華による影響も調べるため、グラファイトとモリブデンを用いた。また、チップへの電流流入による加熱の影響を考慮し、ヘッドチップをガラス管で絶縁した場合と金属管で接続した場合で計測を行った。熱負荷の評価においては、チップ側面からの熱入力も考慮した。その結果、内部電極先端近傍における熱負荷のエネルギー密度は、最大 4MJ/m² に達することが分かった。そのエネルギー密度は、磁場印加時においても変化はみられなかった。このことから、磁場印加の有無による W 板へのプラズマ照射条件に違いがないことが確認できた。また、二分岐光学系を備えた高速カメラにより、二線強度比による W 板表面の二次元温度計測も行った。W 板へのプラズマ照射時は、プラズマの発光が強く温度計測ができなかったが、プラズマ照射直後にあたる放電後 200 μ s 前後からは、温度計測が可能であった。計測により、磁場印加の有無に関係なく、照射直後でも W 板の表面温度は

W の融点に近い 3700K であることが確認できた。熱負荷入力 of 計測結果を基に、ANSYS を用いて三次元熱伝導シミュレーションも実施し、W 板表面において 3000K 以上の温度上昇となることが確認できた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 5 件)

1) 池田拓弥, 福本直之, 淡路谷研吾, 永田正義, 宮澤順一, 時谷政行, 増崎 貴, 山田弘司, 「SPICA プラズマガンを用いた W 材料溶融層からのドロップレット飛散の磁場依存性の検証」, プラズマ・核融合学会第 33 回年会, 平成 28 年 12 月 1 日, 01aP77, 東北大学青葉山キャンパス (宮城県仙台市).

2) 池田拓弥, 福本直之, 永田正義, 八木郁人, 宮澤順一, 時谷政行, 増崎 貴, 山田弘司, 「SPICA プラズマガンを用いた W 材料へのパルス高熱負荷照射」, 平成 28 年度核融合科学研究所共同研究 研究会「高ベータトラスプラズマの自律的構造形成と維持」, 平成 28 年 8 月 11 日, 核融合科学研究所 (岐阜県・土岐市).

3) M. Nagata, N. Fukumoto, T. Ikeda, I. Yagi, J. Miyazawa, M. Tokitani, S. Masuzaki and H. Yamada, “Experimental studies of droplet splashing from tungsten melt layer generated by the SPICA plasma gun facility”, Abs. of 22nd International Conference on Plasma Surface Interactions in Controlled Fusion Devices, May 30 2016, Pl.73, Pontificia Università Urbaniana (Rome, Italy).

4) 池田拓弥, 福本直之, 八木郁人, 山崎陽亮, 淡路谷研吾, 永田正義, 宮澤順一, 時谷政行, 増崎 貴, 山田弘司, 「パルス高熱負荷照射のための SPICA プラズマガンを用いた磁場中での W 材料の溶融と飛散の観測」, プラズマ・核融合学会第 32 回年会, 平成 27 年 11 月 24 日, 24aD40P, 名古屋大学東山キャンパス (愛知県・名古屋市).

5) I. Yagi, Y. Yamasaki, N. Fukumoto, M. Nagata, J. Miyazawa, M. Tokitani, S. Masuzaki, H. Yamada, “Formation of W droplets splashing by pulsed heat flux irradiation using the SPICA plasma gun”, Proc. of Plasma conference 2014, Nov. 20 2014, 20PA-046, Tokimesse (Niigata, Niigata, Japan).

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

○取得状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

[その他]

6. 研究組織

(1) 研究代表者

福本 直之 (FUKUMOTO, Naoyuki)
兵庫県立大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 90275305

(2) 研究分担者

永田正義 (NAGATA, Masayoshi)
兵庫県立大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 00192237

(3) 研究分担者

菊池 祐介 (KIKUCHI, Yusuke)
兵庫県立大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 00433326

(4) 連携研究者

宮澤 順一 (MIYAZAWA, Junichi)
核融合科学研究所・教授
研究者番号: 50300728

(5) 連携研究者

増崎 貴 (MASUZAKI, Suguru)
核融合科学研究所・教授
研究者番号: 80280593

(6) 連携研究者

時谷 政行 (TOKITANI, Masayuki)
核融合科学研究所・助教
研究者番号: 30455208