

令和 4 年 6 月 13 日現在

機関番号：63902

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K14690

研究課題名(和文) 極大熱パルスを用いた金属中のHeバブル挙動の解明

研究課題名(英文) A study about behavior of He bubbles on metal surface using high thermal pulse

研究代表者

浜地 志憲 (Hamaji, Yukinori)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教

研究者番号：60761070

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：タングステンにHeイオンを照射した際に、Heがナノスケールの泡状の構造を形成することが知られている。このバブル構造がどの程度の時間スケールで材料中で運動するのかを調べるため、熱パルスによって短時間の高温状態を作ることによって調べることを目指し、研究を行った。本期間では、直線型プラズマ装置TPD-IIにHe照射温度を制御可能な試料照射システムを設計・製作して温度制御プラズマ照射を実現し、並行して高速で測定可能な2色型放射温度計を設計・製作して熱パルス時の温度計測を可能とした。また、電子顕微鏡でのHeバブルの観察によって、熱パルスによるHeバブルの運動についての知見が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

タングステン中のヘリウムバブルの運動がmsで起きることは、核融合炉のプラズマに対向する炉壁において予測される現象である。その理解のために短時間の熱パルスによる手法が有効であることが示された。また、材料中に気体粒子によるバブル構造が生じることは鋼材中の水素などでも見られており、熱パルスによるバブルの運動速度を得るこの手法は核融合分野外への応用も期待できる。

研究成果の概要(英文)：It is known that He forms a nanoscale bubble-like structure in tungsten. In order to investigate the time scale of moves of the structure in the material, we performed thermal pulse experiments creating a high temperature state for a short period of time. In this budget period, a specimen irradiation system with controllable temperature was designed and built for the linear plasma device TPD-II to enable temperature-controlled plasma irradiation. In addition, a two-color pyrometer with high-speed measurement capability was also designed and established to enable temperature measurement during thermal pulses. Observations of He bubbles by a scanning electron microscope provided information of the motion of He bubbles during thermal pulses.

研究分野：プラズマ材料相互作用

キーワード：タングステン プラズマ材料相互作用 熱パルス 微細組織観察 He誘起微細構造

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

核融合炉の炉内壁では、燃料元素に加えて核融合反応で生成したヘリウムイオンが壁材料に照射される。ヘリウム(He)イオンを金属に打ち込むと材料表面にナノメートルスケールの大きさの泡状の「He バブル」が形成されることがあり、この現象はプラズマを使った材料の高機能化や核融合炉炉壁での現象などに関わるが、その動きや成長は 1 秒以下の短い時間スケールで進むため、先行研究では、 μs 程度までの詳細な第一原理計算では十分な計算ができておらず、実験的な秒スケールでのその場観察ではその移動や成長を詳細に観察できていない状態であり、ms オーダーの実験的観察が期待されていた。

2. 研究の目的

本研究では、あらかじめヘリウム照射を行ったタングステン試料に対して、1 ms 程度がそれ以下の短時間の高温状態を作りだし、予照射によって形成された He バブルの運動について、例えば、どの時間スケールでどの大きさの He バブルが拡散できるのか？を調べることを目的とした。

3. 研究の方法

(1), He イオン照射

本研究では、当初温度制御条件で大量の He イオン照射が可能な、ドイツ、ユーリッヒ研の PSI-2 での He 照射実験を予定していた。しかし、COVID-19 による渡航制限によって実験が不可能となったことから、研究代表者が所属する核融合科学研究所の直線型プラズマ装置 TPD-II に温度制御が可能な試料照射システムを設計・製作してヘリウム照射実験を行った。

(2), 熱パルス実験

ヘリウム照射後の熱パルス実験は、電子ビーム装置とレーザー装置を用いた実験を行った。本研究にあたり、パルス的な温度変化を計測するために、高速で動作する 2 色の放射温度計を設計・製作した。

4. 研究成果

(1), 温度制御可能な新規照射システムの設計・製作

当初予定していた PSI-2 装置でのプラズマ照射が行えなくなったため、研究代表者所属先の直線型プラズマ装置 TPD-II の試料照射システムを新設し、本研究の照射を行った。これまで TPD-II では材料を照射する実験は行われていなかったため、装置下流部にはプラズマを受ける水冷ダンプのみが装備されていた。本研究で製作した新照射システムの実験中の写真と概念図を図 1 に示す。その要件としては下記の 3 点を設定した。1. 室温付近での実験のための水冷システムと高温での実験のための空冷システムを併存させられること。2. 照射中の試料の温度を熱電対で測定可能であること。3. 目標温度に対する現在温度の高低をフィードバックし、リアルタイムでの冷却水・冷却空気の流量制御が可能であること。これは、典型的な照射実験(1 時間以上)ではプラズマからの加熱入力のフラつきが起きるため、これを冷却能力の制御によって吸収することを目的としている。このような要件は当初利用予定であった PSI-2 にも装備されていないため、より高精度な実験を目指した設計として設定した。新規試料ホルダでは、水冷・空冷の切り替えやフィードバック制御は想定通り動作し、温度制御実験が研究代表者の所属先で可能となった。

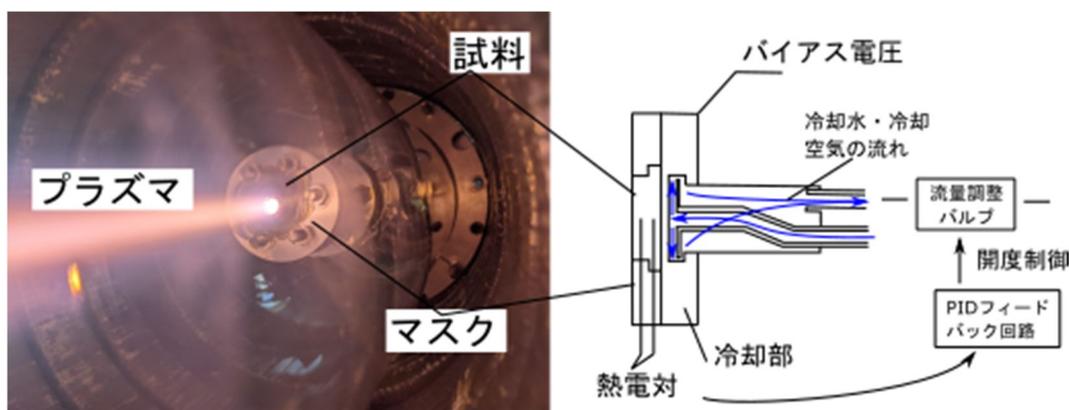


図 1 本研究にあたり設計・製作した温度制御試料ホルダの実験中写真と概念図

(2), 高速動作 2 色型放射温度計の設計と製作

本研究では、1 ms 以下の短時間での温度履歴が重要である。しかし、このような高速の温度変化は本研究で対象とするような極大熱パルスのような現象でしか生じないため、既製の放射温度計では速度が十分ではない。そのため本研究では、高速で動作する検出器とレンズ、バンドパスフィルタを選定し、高速で動作する 2 色型の放射温度計を設計・製作した(図 2)。検出器は Thorlabs 社製 PDA20CS2、InGaAs 検出器(検出波長 800 - 1700 nm、11 MHz)を用い、対象とする温度によって適したバンドパスフィルタを簡易に交換可能な構造とした。図 2 右に製作した温度計での計測例を示す。計測例ではピーク出力 9kW、ビーム径約 0.6 mm のレーザーをタングステン表面に照射した場合のものを示した。この実験では、約 2 ms のパルス幅のレーザーを照射しており、その照射パワーの時間発展は付属のパワーメータで計測しており、図中のレーザー出力信号として示している。図 2 の例では高温での測定のため、比較的波長の近い 1550 nm と 1350 nm の 2 つの波長を通過させるバンドパスフィルタを使用した。結果として、レーザーによって表面温度が高温になる 1 ms 程度から十分な信号が得られた。これまでの成果で十分な高速計測が可能となったため、今後はタングステンの融点などを用いて高温での高精度な測定を目指した温度較正を行う予定である。

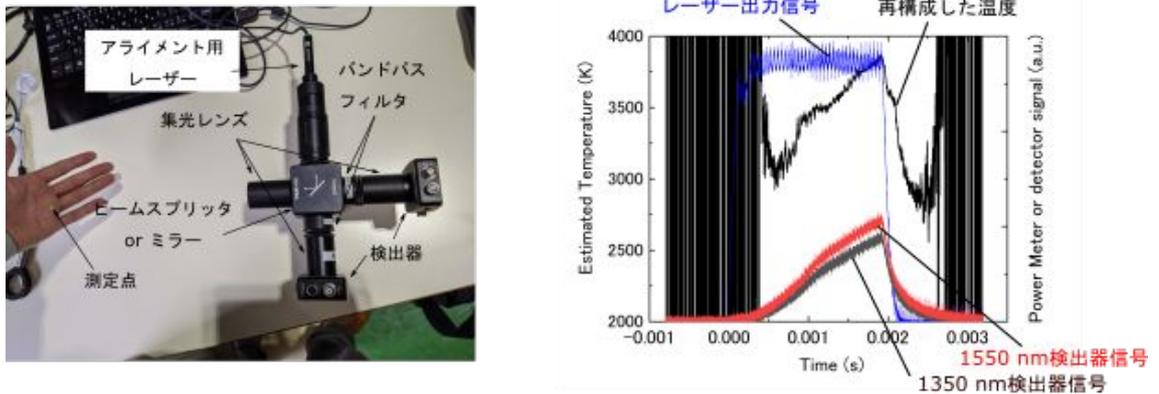


図 2 本研究にあたり設計・製作した高速動作 2 色放射温度計の外観写真と信号例

(3), He バブルの熱パルスでの運動の観察

図 3 は、He 照射を 1100 K, $3 \times 10^{25} / \text{m}^2$ で行ったのち、電子ビームを用いた熱パルス実験(ピーク熱負荷 500 MW/m², 0.5 ms)を超高熱負荷試験装置 ACT2 で行った前後のタングステン表面の SEM 像(走査型電子顕微鏡像)である。熱負荷を与える前の観察でも、プラズマ照射中に He バブルが成長し、表面に到達することで形成されるホールと呼ばれる構造が多数見られた。熱負荷後に同一の点を観察したところ、ホールの密度が明らかに増大していた(左右図の右下の拡大図では、中央の特徴的なホールの周辺に新たなホールが形成している)。これは、熱負荷による短時間の高温によって He バブルが移動し、表面に到達したものがあつたためにホールが形成したこと、この温度が表面の既存のホールを消滅させるほどのタングステン原子の表面拡散を起こさなかったことを示唆している。図 3 は、前述の新照射システムや放射温度計の製作前の実験であるため詳細な温度履歴等の測定がないが、今後は本研究で整備した設備での研究の発展が期待できる。

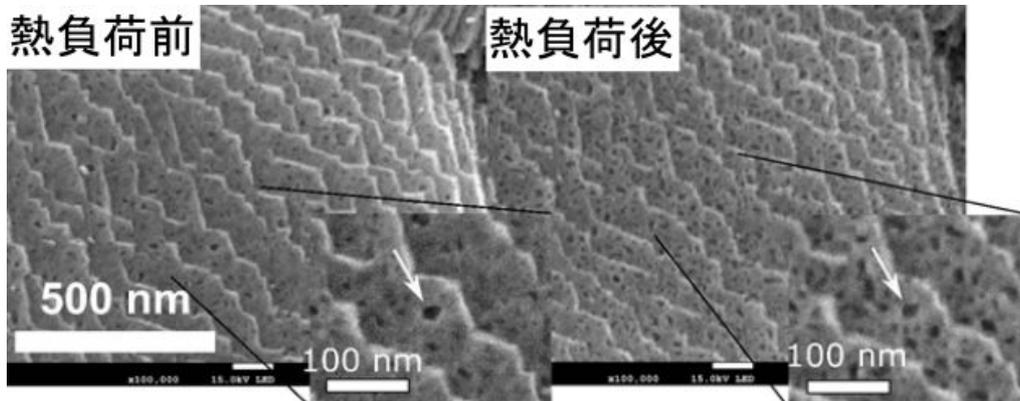


図 3 He バブルによって形成されたホールの密度が熱負荷によって 増大した様子(SEM 正面画像)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 0件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Hamaji Y., Tokitani M., Kreter A., Sakamoto R., Sagara A., Tamura H., Masuzaki S.	4. 巻 18
2. 論文標題 Influence of thermal shocks on the He induced surface morphology on tungsten	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nuclear Materials and Energy	6. 最初と最後の頁 321 ~ 325
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.nme.2019.01.029	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yoshihashi S., Tsuneyoshi T., Tsuchida K., Furuzawa D., Honda S., Watanabe K., Yamazaki A., Tsuji Y., Hamaji Y., Tokitani M., Tamura H., Sagara A., Kiyonagi Y., Uritani A.	4. 巻 16
2. 論文標題 High heat removal technique for a lithium neutron generation target used for an accelerator-driven BNCT system	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Instrumentation	6. 最初と最後の頁 P04016 ~ P04016
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1748-0221/16/04/P04016	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------