

平成 22 年 3 月 1 日現在

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2006～2008

課題番号：18360442

研究課題名（和文） 高Zプラズマ対向壁材料に及ぼす間欠的熱負荷の影響

研究課題名（英文） Effects of repeated pulsed heat load on high Z plasma facing materials

研究代表者

上田 良夫 (UEDA YOSHIO)

大阪大学・工学研究科・教授

研究者番号：30193816

研究成果の概要：

核融合炉の壁材料として最も有力なタングステン材に、ELM（Edge Localized Mode）と呼ばれる不安定性により与えられる熱パルスと同等の熱負荷をパルスレーザーで繰り返し与え、タングステンの表面損傷の発生条件を調べた。その結果、熱疲労により表面損傷が発生する閾値を明らかにし、表面損傷発生が試料温度、材料組織、及び表面不純物（炭素、酸素）に強く依存することを明らかにした。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	9,900,000	0	9,900,000
2007年度	3,600,000	1,080,000	4,680,000
2008年度	1,600,000	480,000	2,080,000
年度			
年度			
総計	15,100,000	1,560,000	16,660,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・核融合学

キーワード：タングステン、間欠的熱負荷、プラズマ対向材料、核融合炉

1. 研究開始当初の背景

プラズマ対向壁材料へのディスラプションやELMによるパルス的高熱負荷の影響については、実験やシミュレーションによる多くの研究が発表されている。実験研究では、プラズマガンを用いた研究結果や、電子ビームによる研究結果が報告されている。プラズマガンを利用した研究では、ITERでのELMを模擬した熱負荷100ショットをタングステンに与えたところ、表面の溶融は観測されたが、溶融層が飛散する様な現象は観測されなかった。また、タングステン溶融に必要な熱負荷の値は、MEMOSコードによるシミ

ュレーションと良い対応を示した。ITERで予想されるELMのエネルギーについては、現在のトカマク装置のデータベースからの外挿値が報告されている。それによれば、単純な外挿で得られるELM（Type Iというカテゴリーに属するもの）のエネルギーは、タングステンの溶融限界を超えるため、そのエネルギーの抑制が必要であるとされている。

これらの研究では、溶融とそれに伴う材料の損耗のみが問題とされているが、融点以下の温度変化であっても、材料表面付近の形状に顕著な影響を与える可能性があることが実験的に示唆されている。T. Renkらは、慣性

核融合炉壁への間欠的な熱負荷の影響を調べるために、パルスイオンビームにより種々の壁材料を照射する実験を行っている。ここでは、パルス幅約 100 ns のイオンビーム 1000 ショットをタングステンに照射したところ、表面の荒さが最高で 30 ミクロン程度まで大きくなったとの報告がある。このように、融点以下の熱負荷条件でも材料表面形状に大きな変化が現れ、ひいてはこれがダストの発生や亀裂の発生などにつながる可能性もある。

Renk らの研究は、非常に示唆に富むものであるが、トカマク装置における ELM 熱負荷のパルス幅は、0.1~1.0 ms と Renk らの実験と比べて遙かに長く、熱の内部拡散が無視できず材料に与える影響は大きく異なると考えられる。また、Renk らの実験では、パルスイオンビームの照射回数は最高で 1000 ショットにとどまり、磁場閉じこめ核融合実験炉で予想されるショット数より遙かに少なく、定常炉での現象を予測するためには、桁違いに多いショット数を照射する必要がある。

これらの現状を鑑みると、特に熔融限界以下のパルス熱負荷条件下での、タングステンの ELM 様パルス負荷に対する応答特性について、系統的な実験が必要である。

2. 研究の目的

本研究では、高強度繰り返しレーザーを用いて、核融合炉壁材料の第一候補材であるタングステンへ 10,000 ショット以上の ELM 様パルス熱負荷を印加し、温度、ショット数、材料組織などを変化させ、系統的な結果を得ることを目的とした。特に、亀裂発生 の 閾値を明らかにすることを、重要な目的の一つとした。またタングステン表面における材料混合の影響について、詳しく調べるため表面酸化・炭化されたタングステン試料について、パルス熱負荷影響を評価した。本研究により、長時間運転を前提とした核融合発電炉の壁材料としての高 Z 材料の評価、あるいは高 Z 材料使用のために必要となる ELM 熱負荷御指針を与えることが可能となる。

3. 研究の方法

真空容器中に設置したタングステン試料に対して、Nd/YAG パルスレーザー装置を用いて、レーザー光 (1.06 μm) でパルス熱負荷を与えた。繰り返し周波数は 10 Hz である。試料は最大 600°C 程度まで予備加熱できる。ELM の熱パルス (0.1~1.0 ms) を模擬するため、フリーランモードでレーザー発振させた。レーザーの試料表面への入射角は 45° である。タングステン試料は、純度 99.99% の焼結材を用い、圧延加工した板材と、鍛造加工した円柱材を実験で使用した。円柱材は組織が、ITER グレードのタングステンに近い。板材の場合は表面に並行に層状の結晶組織

を持ち、円柱材の場合は、表面に垂直な方向に結晶粒界が形成されている。また、レーザー照射に伴う温度分布野時間変化や、熱応力変化については、有限要素シミュレーションコード ANSYS を用いて計算を行なった。この際、タングステンの物性値の温度変化を考慮した。

4. 研究成果

(1) レーザー光の特性評価

レーザーの熱負荷特性評価のため、パルス時間波形、空間分布、及びタングステンの吸収率を測定した。パルス波形は 5~10 μs のパルスが複数連続した波形であり (図 1)、実効的なパルス幅は 130 μs 程度である。

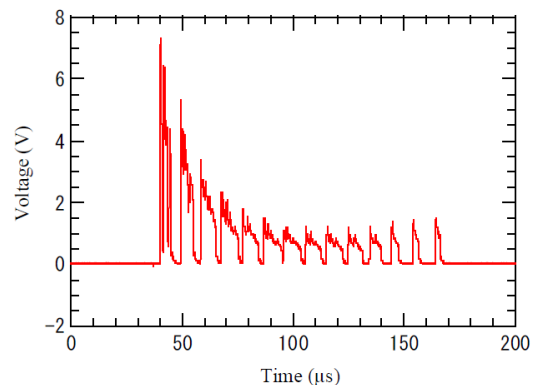


図 1 レーザーパルス波形 (縦軸の電圧は、レーザーパワーに比例)

また、空間分布をプロファイラーで測定したところ、基本的にはガウス分布をしているが、ビーム径を 0.5 mm 程度まで絞ると長軸/短軸比が 1.5 程度の楕円となる。なお、エネルギーフルエンスの値は、ピーク値の半分の値として定義している。

レーザー熱負荷実験において、レーザーエネルギーのタングステンによる吸収率を見積もることは重要である。タングステン板をテフロンで支持して熱絶縁状態に置き、レーザーパルス照射したときの温度上昇よりエネルギーの吸収率を求めた。タングステンの表面は、機械的に鏡面研磨 ($R_a \sim 0.01 \mu\text{m}$) を施してある。レーザーパルスのエネルギーフルエンスと照射回数を変えたときのエネルギー吸収率の測定結果を図 2 に示す。

図 2 より、エネルギーフルエンスが、0.8 kJ/cm² 以下の場合には、照射回数が増えてもエネルギー吸収率は大きな変化はなく、約 30% である。1.7 kJ/cm² の場合には、照射回数と共に吸収率が増加しているが、これは表面の一部が熔融して、表面形状が大きく変化して荒れが生じ、レーザー光が多重反射することで実効的な吸収率が増加したと判断される。これよりエネルギーフルエンスが小さい場合は、表面に μm オーダーの荒れや細か

い亀裂が発生しているものの、吸収率に大きな違いはない。

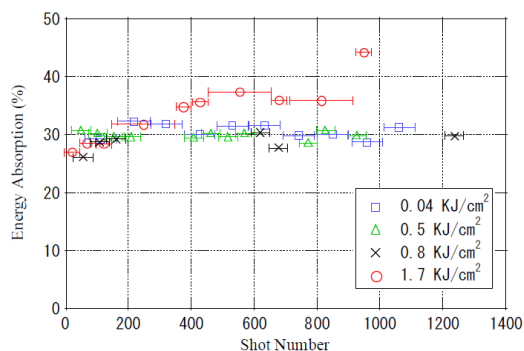


図2 Nd/YAG レーザーのエネルギー吸収率

(2) タングステンの表面損傷

表面が熔融するエネルギーフルエンス以下でも、多数回の照射により表面に荒れが生じ、亀裂が発生することが分かった。図3にこの亀裂発生時の閾値エネルギーフルエンス近傍で、10,000回のレーザー照射を行なったタングステン試料の表面状態を示す。

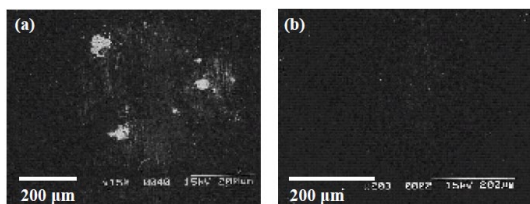


図3 レーザーフルエンス 14 J/cm² で 10,000 回の照射を行なったタングステン (板材) の表面状態 (a) 200°C、(b) 500°C。

200°C照射の場合(a)では、表面にわずかに損傷が発生しているが、500°Cの場合はほとんど変化が見られない。これは、500°Cではタングステンの延性が大きいために、微少な亀裂が入りにくいためと考えられる。同様の実験を円柱材で行なった結果を図4に示す。図4より、板材と同様に500°C照射(b)では、200°C照射(a)に比べて表面損傷が少なく、やはり温度上昇による延性の影響が見られる。しかしながら、500°Cの場合(b)でも、表面に若干の損傷が生じており、板材材料に比べて円柱材の方がパルス熱負荷の影響が大きいことが示唆される。

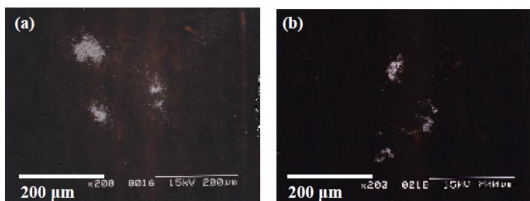


図4 レーザー照射後の円柱材タングステンの表面状態。照射条件は図3と同じ。

このように、試料温度や材料組織依存性はあるものの、この 14 J/cm² というエネルギーフルエンスが、ほぼ表面損傷発生時の閾値であるということが明らかになった。

また、図3～4の照射条件で、表面温度変化とその結果発生する熱応力の計算を行なった。その結果を図5と図6に示す。

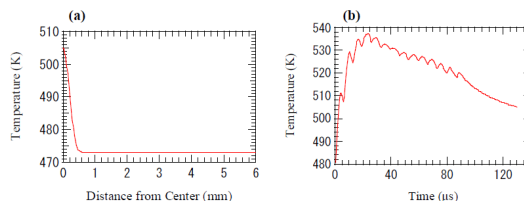


図5 温度の径方向分布(a) (時間 140 µs) と中心温度の時間変化(b)。

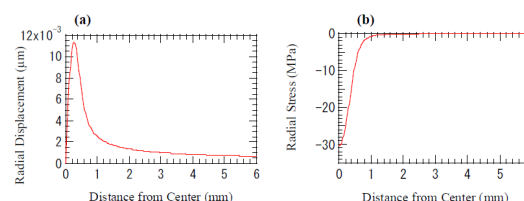


図6 径方向変位(a)と内部応力の径方向分布(b)。時間は 140 µs。

図5より、14 J/cm²のエネルギーフルエンスでは、中心温度は最大でも約60°C程度しか上昇しない。また、140 µs経過後は、温度上昇のため、レーザー照射部は膨張し、圧縮応力が発生していることが、図6(b)より分かる。また、この熱膨張に伴う径方向変位は、中心から200~300 µm近傍が最も大きい。一方、図3や図4から表面の損傷は中心から200 µm近傍に発生していることが分かる。これらより、表面損傷は熱膨張及びその後の収縮による表面変位による熱疲労が原因と推察できる。今回の実験はレーザーによるスポット加熱の結果であり、実際のプラズマ対向材料では、モノブロック材の大きさに比して、ほぼ様な熱負荷が与えられるため、条件は異なるが、このような変位やそれに伴う熱応力を算出して比較することで、今回の結果を実際の対向材料表面での現象評価につなげることが可能である。

次に、表面に不純物混合層が発生した場合の影響について調べた結果を示す。図7に表面炭化層、図8に表面酸化層が形成された場合のパルス熱負荷影響実験の結果を示す。

表面に炭素不純物がほとんど存在しない場合(図7(a))には、わずかに表面損傷が発生するのみであるが、表面に酸化層が形成される場合は、広い領域に表面損傷が発生していることが分かった。理由としては、炭化層の存在により表面の延性が低下し亀裂が入りやすくなったことが考えられる。

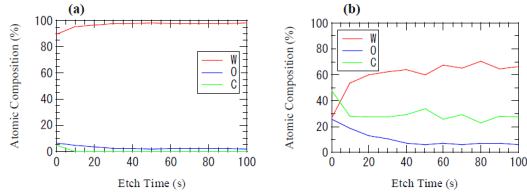
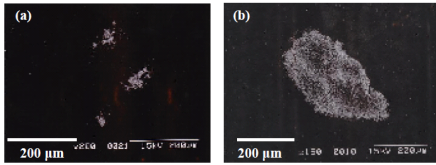


図7 (a)炭化層がほとんど無い場合のレーザーパルス照射後の表面状態と、表面近傍元素深さ分布。(b)炭化層がある場合の同様のデータ。照射条件は、図3と同じ。

同様の実験を、表面に酸化層が形成された場合に行なった。その結果を図8に示す。

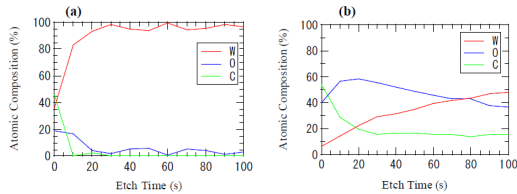
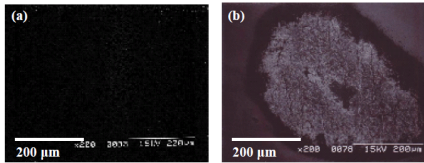


図8 酸化層の有無による表面状態の違い。(a)酸化層なし、(b)酸化層あり。レーザー照射条件は図3と同じ。

酸化層が無い場合(図8(a))は、ほとんど表面損傷が発生しないが、酸化層が存在する場合には、広い範囲で表面損傷が発生している。

図7や図8の結果より、タングステンへの間欠的熱負荷の影響を評価する際には、表面の不純物混合層の影響を評価することが非常に重要であり、そのためにはできるだけ実際のプラズマ照射条件に近い混合プラズマ照射を行ない、同時にパルス熱負荷照射を行なう必要がある。

(3)まとめ

タングステン材料は、繰り返しパルスレーザー照射により、パルスあたりの温度上昇が60°C程度(初期のレーザー吸収率が30%と仮定)という極めて低い場合でも、表面損傷が発生することが明らかになった。このことは、トカマクプラズマにおけるELMによるパルス

熱負荷が、たとえ熔融条件よりも大幅に低減されたとしても、タングステンプラズマ対向材料に極めて大きな影響を与える可能性があることを示唆する。さらに、今回の研究で新たに表面不純物層の影響が表面損傷の発生に非常に大きく影響することが明らかになった。

これらの結果より、より実機に近い混合プラズマ照射下でのパルス熱負荷実験の必要性が示されたことが、本研究の核融合炉開発研究に対する大きなインパクトである。今後は、この研究成果を受けて、プラズマ・パルス熱負荷同時照射の影響を、様々なタングステン材料に対して明らかにし、ITERや発電実証炉におけるタングステン材料の開発や核融合炉運転条件の最適化につなげていく必要がある。

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4件)

(1) Y. Ueda, M. Fukumoto, J. Yoshida, Y. Ohtsuka 他(全7名), "Simultaneous irradiation effects of hydrogen and helium ions on tungsten", Journal of Nuclear Materials, Volumes 386-388 (2009) 725-728 (査読有)。

(2) Y. Ueda, H. Kashiwagi, M. Fukumoto, Y. Ohtsuka, N. Yoshida, "EFFECTS OF HELIUM IONS ON HYDROGEN ISOTOPE BEHAVIOR IN TUNGSTEN", Fusion Science and Technology, VOL. 56 JULY 2009, 85-90(査読有)。

(3) Y. Ueda, M. Toda, M. Nishikawa, K. Kondo, K. A. Tanaka, "Effects of repetitive ELM-like heat pulses on tungsten surface morphology", Fusion Engineering and Design 82 (2007) 1904-1910(査読有)。

(4) Y. Ueda, N. Ohno, S. Kajita, H. Kurishita, H. Iwakiri, K. Tokunaga, "DEVELOPMENT OF TUNGSTEN MATERIALS FOR PLASMA FACING COMPONENTS IN JAPAN", Fusion Science and Technology, Vol. 52, October 2007, 513-520(査読有)。

〔学会発表〕(計15件)

(1)中塚基晃、上田良夫他(10人目)全10名、"プラズマガンを用いたITERダイバータにおけるELM熱負荷模擬実験"、第26回プラズマ・核融合学会、2009年12月2日、京都市国際交流会館。

(2)H.T.Lee、上田良夫、"Synergistic effects in tungsten and carbon-tungsten mixed materials"、第26回プラズマ・核融合学会、2009年12月2日、京都市国際交

流会館。

(3) 暮橋英昌、上田良夫、大塚裕介、“短パルス繰り返し熱負荷がタングステンに与える影響”、日本原子力学会秋の大会、2009年9月16日、東北大学青葉山キャンパス。

(4) 上田良夫、大塚裕介、福本正勝、杉山一慶、“第一壁タングステン上の炭素堆積層形成と重水素吸蔵の温度依存性”、日本原子力学会秋の大会、2009年9月16日、東北大学青葉山キャンパス。

(5) H. Kurehashi, Y. Ohtsuka, Y. Ueda, H. Kurishita, “Effects of repeated short heat pulses on tungsten”, 14th International Conference on Fusion Reactor Materials, September 8 (2009), Sapporo Japan.

(6) Y. Ueda, H. Tanaka, K. Tanimoto, Y. Ohtsuka 他(全11人)、“Effect of Radiation Damage on Deuterium Retention in Tungsten”, 14th International Conference on Fusion Reactor Materials, September 8 (2009), Sapporo Japan.

(7) Y. Ueda, “Material mixing of tungsten with low Z materials-Carbon and Helium-”, ITER International Summer School 2009, June 26 (2009), Aix en Provence, France.

(8) 上田良夫、“炉内トリチウム蓄積量制御に関する研究開発の現状と課題”、第25回プラズマ・核融合学会年会、2008年12月5日、栃木県総合文化センター。

(9) 暮橋英昌、植木允啓、大塚裕介、上田良夫、“短パルス繰り返し熱負荷がタングステンに与える影響”、第7回核融合エネルギー連合講演会、2008年6月21日、青森市男女共同参画プラザ、青森市。

(10) 上田良夫他(全7名)、“第一壁タングステン材料中の水素同位体挙動に及ぼすヘリウムイオン同時入射の効果”、日本原子力学会春の年会、2008年3月27日、大阪大学吹田キャンパス、吹田市

(11) Y. Ueda, M. Fukumoto, Y. Ohtsuka, “Effects of helium ions on hydrogen isotope behavior in tungsten”, 18TH TOPICAL MEETING ON THE TECHNOLOGY OF FUSION ENERGY, September 28 (2008), The Stanford Court Hotel San Francisco, USA.

(12) 上田良夫他(全4名)、“水素同位体イオン照射によるタングステンのブリスタリングの発生機構”、日本原子力学会春の年会、2007年3月28日、名古屋大学、名古屋市。

(13) Y. Ueda 他(全5名)、“Effects of repetitive ELM-like heat pulses on tungsten surface morphology”, 24th Symposium on Fusion Technology, September 12 (2006), Palace of Culture and Science, Warsaw, Poland.

(14) 上田良夫、“核融合実験装置における発

電実証プラントを目指したプラズマ対向材料研究開発”、第23回プラズマ・核融合学会、2006年11月30日、筑波大学大学会館、つくば市。

(15) 上田良夫、近藤公伯、田中和夫、“繰り返し熱負荷のタングステンプラズマ対向材料への影響”、日本原子力学会秋の大会、2006年9月27日、北海道大学、札幌市。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

上田 良夫 (UEDA YOSHIO)
大阪大学・工学研究科・教授
研究者番号：30193816

(2) 研究分担者

大塚 裕介 (OHTSUKA YUSUKE)
大阪大学・工学研究科・助教
研究者番号：70294048

(3) 連携研究者

西川雅弘 (NISHIKAWA MASAHIRO)
大阪大学・工学研究科・特任教授
研究者番号：50029287