

J-PARC 3MeV LINAC 用ビームターゲット材料の検討

STUDY OF BEAM TARGET MATERIALS FOR A 3-MeV LINAC AT J-PARC

平野耕一郎^{#, A)}, 福田誠^{B)}, 江里幸一郎^{B)}, 徳永和俊^{C)}

Koichiro Hirano^{#, A)}, Makoto Fukuda^{B)}, Koichiro Ezato^{B)}, Kazutoshi Tokunaga^{C)}

^{A)} Japan Atomic Energy Agency

^{B)} National Institutes for Quantum Science and Technology

^{C)} Kyushu University

Abstract

Using a 3 MeV linac with negative hydrogen ion beam energy, multiple irradiation tests were conducted on tungsten materials meeting the ITER requirements, in which temperature changes of heating and cooling were repeatedly given at 5 Hz cycles. As a result, protrusions and cracks were observed on the surface of the test piece using SEM device, which were presumably caused by repeated expansion and contraction due to rapid pulse-like temperature change.

1. はじめに

J-PARCリニアックのMEBT領域にあるビームターゲット[1]は炭素複合材を素材として使用し、ビームエネルギー3 MeVの負水素イオンビームによって多重照射されている。今後、リニアックのビーム電流が増強されるため、ビーム照射による化学的な変化や昇華などにより、発生ガスや損傷が増大することが懸念される。一般的なビームターゲットや核融合実験炉(ITER)のダイバータには、低放射化、高熱伝導率および高強度の特性を有する材料として、タングステンが使用されている。タングステンをビームターゲットとして使用する場合、多重照射による脆性破壊が懸念されるため、使用限界や使用条件を明らかにする必要がある。そこで、負水素イオンビームエネルギー3 MeVの加速器を使用し、ITERの要求仕様を満たすタングステン材料に対して、加熱及び冷却の温度変化を5 Hz周期で繰り返し与える多重照射試験を実施した。その結果、試験片表面に突起や亀裂が観測され、温度変化による膨張収縮の繰り返しによって発生し、進展したと推測された。本件では、加熱および冷却の温度変化を繰り返すような多重照射によるタングステンの熱疲労による損傷について調べたので、報告する。

2. 試験体系

2.1 3 MeV リニアック

3 MeV リニアック[2]を用いた照射試験体系を Fig. 1 に示す。3 MeV リニアックは、セシウム添加高周波駆動型負水素イオン源(以下、RF イオン源という)、RFQ(4号機)、ビーム輸送用電磁石および照射チャンバで構成される。照射チャンバ内には、ビーム軸に対して45度傾斜したスクレーパヘッド[2]を設置した。Q電磁石には、ステアリング電磁石およびビーム位置モニタが設置されている。試験では、ビームがQ電磁石の中心に常に来るように、ステアリング電磁石の電流を調整し、ビーム重心位置をビーム位置モニタで確認した。照射チャンバにはクライオポンプ、四重極型質量分析器 QMG220M2(以下、

QMS という)および真空ゲージを設置し、ビーム照射時の残留ガスの圧力を測定した。加速器は、ビームエネルギー3 MeV、RFQ 出口のビーム電流 54 mA、繰返し 5 Hz で運転し、ビームパルス幅を 53 μ s~500 μ s まで変えることによって、1パルス当たりのビーム電流を変化させることができる。

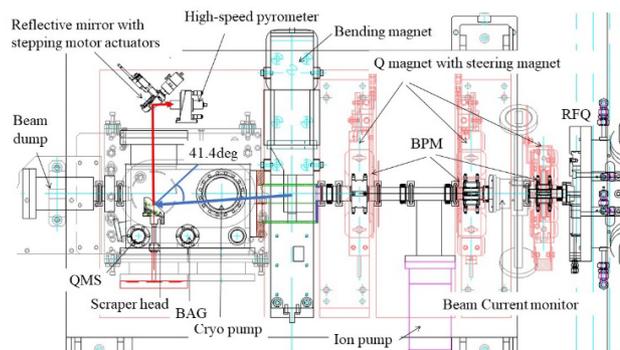


Figure 1: Layout of the MEBT line of the 3MeV linac.

2.2 試験片

アライドマテリアル製イーターグレードタングステンを試験片(W12 mm×L28 mm×t5 mm)として用いた。ビーム照射される試験片の表面(12 mm×28 mm)は圧延方向に垂直(RD面)になっており、厚さ方向の熱伝導率は170 W/mKである。Figure 2に示すように試験片は炭素複合材製スクレーパヘッド上に設置され、その上から炭素複合材を挟んでタンタル製クリップで固定されている。また、試験片はRFQ出口ビームポートから見えないようにビームライン中心からずらして設置されている。このため、ビームは偏向電磁石によって曲げて照射される。スクレーパヘッドは27°Cで水冷されており、試験片は間接的に冷却される。

[#] hirano.koichiro@jaea.go.jp

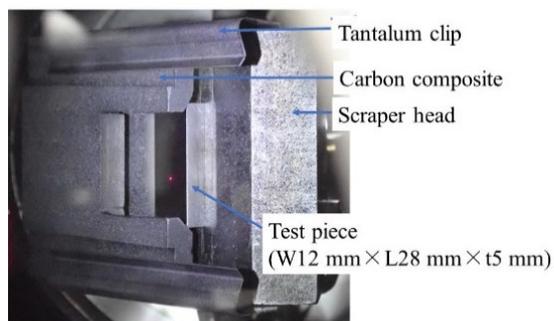


Figure 2: The photograph of the test piece on the scraper head.

2.3 ビーム電流

RF イオン源から出力されるビーム電流は RF イオン源に負荷される 2 MHz 増幅器の出力電力によって調整される。RFQ 入口の電流モニタの値が一定になるように 2 MHz 増幅器の出力電力を制御して、ビーム電流は $\pm 1\%$ で制御される。RFQ 出口の電流モニタで検出された信号は、積分回路で積分されて粒子数コンパレータに入力される。ビーム電流の積分値を粒子数コンパレータで粒子数に換算して、試験片に照射される粒子数の数値データとした。

2.4 ビームサイズ

幅 0.1 mm のスリット付きのファラデーカップが付いた真空導入機[3]を用いて、水平方向および垂直方向のビームサイズを測定した。水平方向のビームサイズを測定する場合、スクレーパヘッドを取り外して真空導入機を設置した。ビームラインのビームサイズは水平方向 σ_x 2.3 mm、垂直方向 σ_y 2.7 mm であった。試験片のビーム入射角は 41.4 度であるため、試験片に照射される水平方向のビームサイズは 1.33 倍大きくなる。照射試験後、ビームサイズを再度測定してビームサイズが変化していないことを確認した。

2.5 試験片表面温度測定

試験片の表面温度の測定体系を Fig. 1 に示す。パルス状に変化する温度を測定するため、高速放射温度計 (IMPAC 社製、IGA740-LO) を用いた。高速放射温度計は、6 μ s の応答速度を有し、350~3500 $^{\circ}$ C の温度範囲を測定できる。放射温度計から試験片表面までの距離を 330 mm に設定し、 $\Phi 2$ mm の領域内の平均温度を測定した。2 軸コントローラ (シグマ光機製、SHOT-102) を用いてステッピングモータアクチュエータ付き金平面ミラーの回転軸、及び、あおり軸を制御し、試験片表面のピーク温度分布を測定した。ピーク温度分布の最大温度を示す位置について、連続的に温度を測定した。ただし、次のパルスが照射される直前の冷却されたベース温度を測定する場合には、30~1000 $^{\circ}$ C を測定できる IPE140 放射温度計 (IMPAC 社製、応答速度 1.5 ms) に交換して測定した。

IGA740 放射温度計および IPE140 放射温度計について、2色温度計 (IMPAC 社製、IGAR12、応答速度 2 ms、測定範囲 350~1300 $^{\circ}$ C) を用いて校正を行った。タングステンは大気中、400 $^{\circ}$ C から変色するため、真空

中で測定した。

Figure 3 に示すようにイーターグレードタングステンの試験片 (W12 mm x L60 mm x t5 mm) をタングステン棒の上に置いてタンタル製クリップで固定し、試験片がスクレーパヘッドに接触している伝熱面積を減少させて、試験片全体の温度がビーム照射時にできるだけ高くなるようにした。ピーク温度の影響が小さくなるようにビーム照射中心から 11.2 mm 離れた場所を2色温度計で測定した。IGA740 放射温度計の放射率を 0.1375、IPE140 放射温度計の放射率を 0.1 に設定し、Fig. 4 に示すように2色温度計の温度と比較した。IPE140 放射温度計は 100 $^{\circ}$ C 以下で高い値を示すため、Fig. 5 に示す構成でヒータの上に試験片を置いて、IPE140 放射温度計と接触温度計とを比較して、100 $^{\circ}$ C 以下の校正を行った。

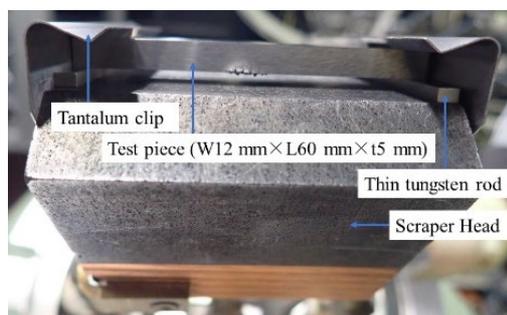


Figure 3: The photograph of a test piece on the scraper head at temperature calibration of the IGA740 pyrometer.

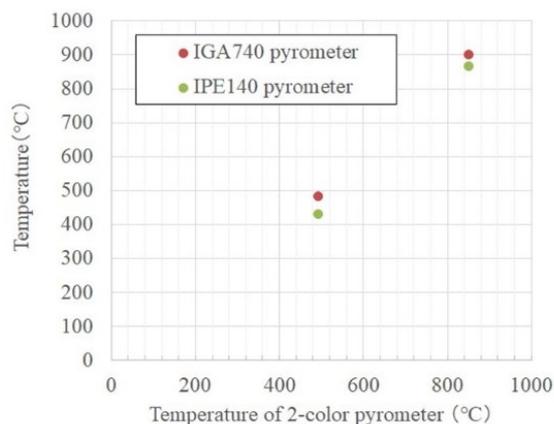


Figure 4: Temperature of pyrometers.

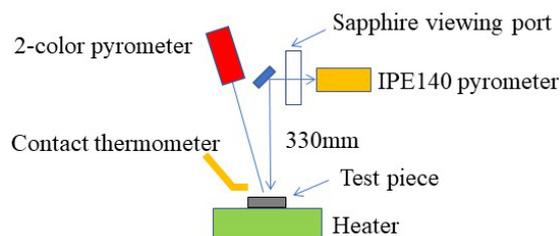


Figure 5: Setting of emissivity of the IPE140 pyrometer.

2.6 タングステンシャッター

試験片の表面温度が 3000 °Cを超えてくると、ビームでスパッタされたタングステンによって、のぞき窓表面が曇ってくる。のぞき窓の曇りによって測定温度が実際の値より低下するため、のぞき窓の温度測定領域が曇らないように、垂直真空導入機のファラデーカップ上に Fig. 6 に示すタングステンシャッターを設置した。3000 °Cを超える可能性のある試験では放射温度計から照射部が見えないようにタングステンシャッターを上昇させ、表面温度を測定する時だけタングステンシャッターを下降させた。

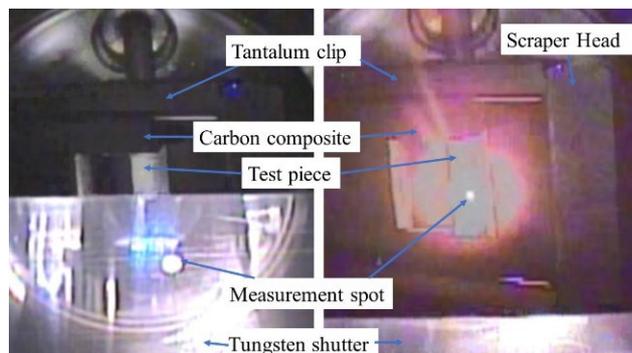


Figure 6: The photograph of the tungsten shutter.

3. ビーム照射試験

照射試験では、ビームエネルギー3 MeV、ビーム電流 54 mA、繰返し 5 Hz およびビームサイズを一定にして、ビームパルス幅だけを 53 μ s、150 μ s、250 μ s と変化させた。これにより、多重照射される領域の熱負荷を変えて、試験片表面の損傷状態を調べた。また、試験片表面の温度変化および残留ガスの圧力変化を測定した。

3.1 試験片表面の温度測定

ビームパルス幅 53 μ s、150 μ s および 250 μ s の時の温度測定の試験結果を Table 1 に示す。各照射試験ののべ時間は約 21 時間半である。ビームパルス幅 250 μ s の時の試験片表面のピーク温度分布を Fig. 7 に示す。Figure 7 のピーク温度分布内の黒印が最大ピーク温度を示す。その最大ピーク温度の場所の温度波形を Fig. 8 に示す。Figure 8 に示すようにピーク温度は 2530 °Cから照射時間経過とともに上昇し、約 8 時間後から安定し、約 21 時間半後に 3170 °Cになった。ビームパルス幅 53 μ s の場合は、約 5 時間後から安定した。ビームパルス幅 150 μ s の場合は、約 8 時間後から安定した。照射時間経過とともにピーク温度が上昇したのは、表面に亀裂が発生し、熱伝導が悪くなったことによるものと推測される。また、ピーク温度が安定したことから、亀裂の進展が約 8 時間で止まった可能性があり、さらに長時間照射を行って、亀裂の進展具合について調べる必要がある。

Table 1: Main Beam Parameters and Temperature Measurement Results

Test piece name	ARD15	ARD12	ARD13
Beam energy (MeV)	3		
Repetition (Hz)	5		
Beam pulse width (μ s)	53	150	250
Peak surface temperature (°C)	680-710	1640-1710	2530-3170
Base temperature (°C)	30(BG)	80	350
Temperature rise (°C)	680	1630	2820
Number of particles per beam pulse	1.84E13	5.03E13	8.39E13
Total number of particles	6.19E18	1.82E19	2.94E19
Energy flux in the area where temperature was measured (MJ/m ²)	0.14	0.38	0.64

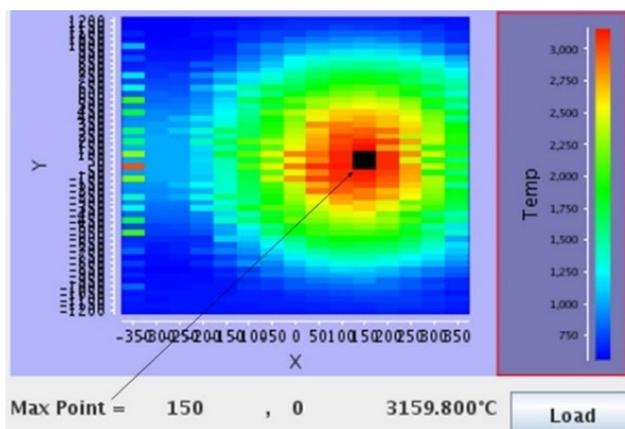


Figure 7: Peak temperature distribution at 250 μ s pulse width.

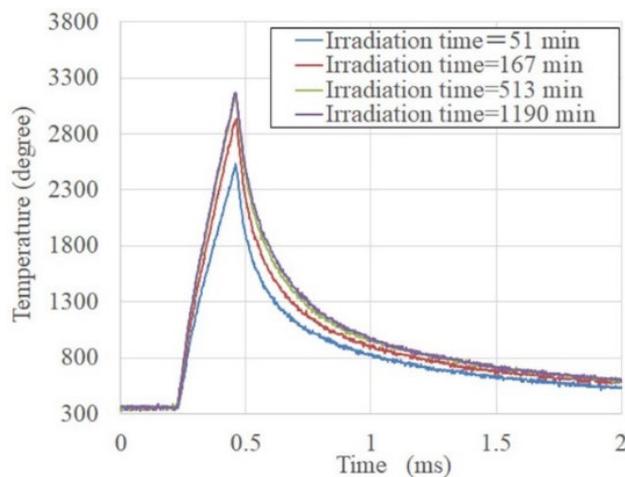


Figure 8: Waveform of the surface temperature measured by the IGA740 pyrometer.

各試験片の照射試験終了前に IPE140 放射温度計に交換してベース温度を測定した。その結果を Table 1 に示す。ビームパルス幅 250 μs の場合、ビームが照射される直前の温度は 350 $^{\circ}\text{C}$ であり、そこから 3170 $^{\circ}\text{C}$ まで上昇したことから加熱及び冷却の温度変化は 2820 $^{\circ}\text{C}$ になっていることが分かった。

ビームサイズを測定した時のビームプロファイルおよび1パルス当たりの粒子数を用いて水平方向および垂直方向のビーム電流分布を求め、ビームが照射される過渡状態の熱負荷を求めた。ビーム照射領域の半径方向の熱流速分布を Fig. 9 に示す。ビームパルス幅 250 μs の時、温度測定領域 $\Phi 2\text{ mm}$ の過渡状態の最大熱流束は 2.6 GW/m^2 、エネルギー流速は 0.64 MJ/m^2 であった。この熱負荷は核融合で発生する周辺局在化モード (ELM) と呼ばれる短パルスの熱負荷に匹敵しており、ELM によるプラズマ対向材料への影響を調べることに有用である。

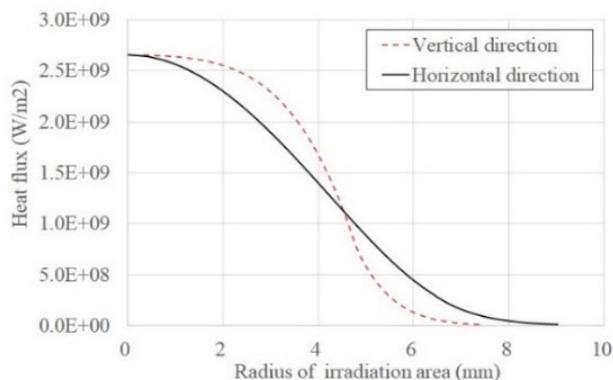


Figure 9: Heat flux vs. radius of irradiation area on a test piece.

3.2 QMS による残留ガスの測定

ビームパルス幅 250 μs の場合について、照射時間に対する残留ガスの圧力変化および試験片の表面温度変化を Fig. 10 に示す。

各ガスの圧力はビーム照射直後に上昇したが、その後単調に減少した。タングステンに 3 MeV 負水素イオンを照射すると深さ約 20 μm のところに水素のブリスターを形成するが、今回の試験片では水素の突発的なガス吐きは観察されなかった。試験片内の水素ガスは 20 μm より深い縦方向の亀裂から放出された可能性がある。試験片表面温度が 3170 $^{\circ}\text{C}$ に増加しても、タングステンの残留ガスを示す質量数 183 および 184 の圧力は増加しなかった。

3.3 試験片表面損傷部の観察

ビーム照射後の試験片の表面について SEM 分析 [4-6] を行った。ビームパルス幅 53 μs 、150 μs および 250 μs の場合について、各試験片の照射部中央の SEM 画像を Fig. 11、Fig. 12 および Fig. 13 に示す。ビームパルス幅 53 μs の加熱冷却の温度差が 700 $^{\circ}\text{C}$ の場合、長さ 50~100 μs の亀裂が結晶粒界に沿って縦横に走っていた。ビームパルス幅 150 μs の加熱冷却の温度差が

1600 $^{\circ}\text{C}$ の場合、縦横の亀裂に加え、表面に傷が付いた場所では細かい捲れあがり重なって盛り上がっているように見えた。ビームパルス幅 250 μs の加熱冷却の温度差が 2800 $^{\circ}\text{C}$ の場合、はっきりとした亀裂が現れ、亀裂に囲まれた表面に幅数十 μm の突起が見られた。その突起の先端には溶融凝固した滑らかな表面があった。

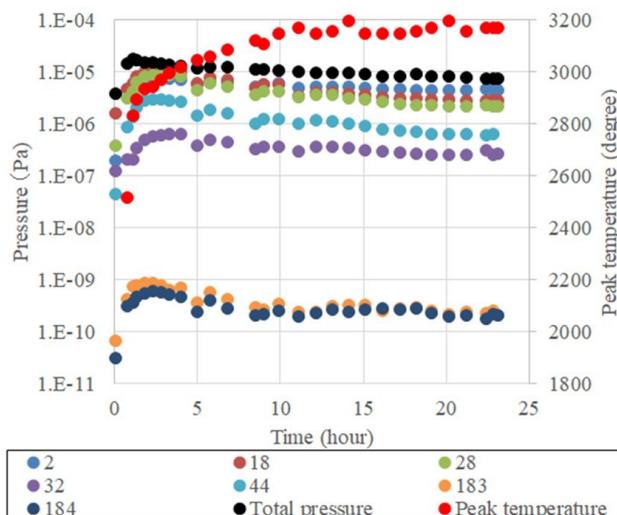


Figure 10: Trend of residual gas pressures and peak temperature at beam pulse width of 250 μs .

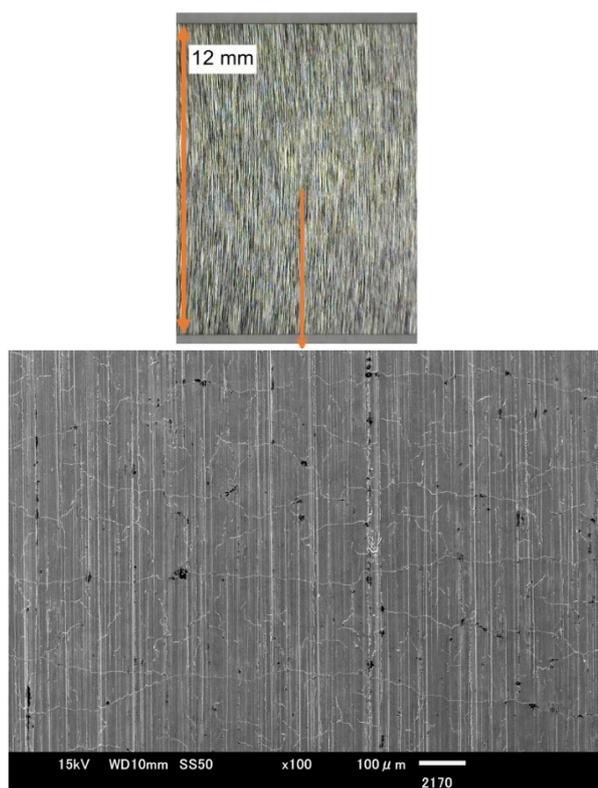


Figure 11: SEM image of a test piece after beam irradiation at beam pulse width of 53 μs .

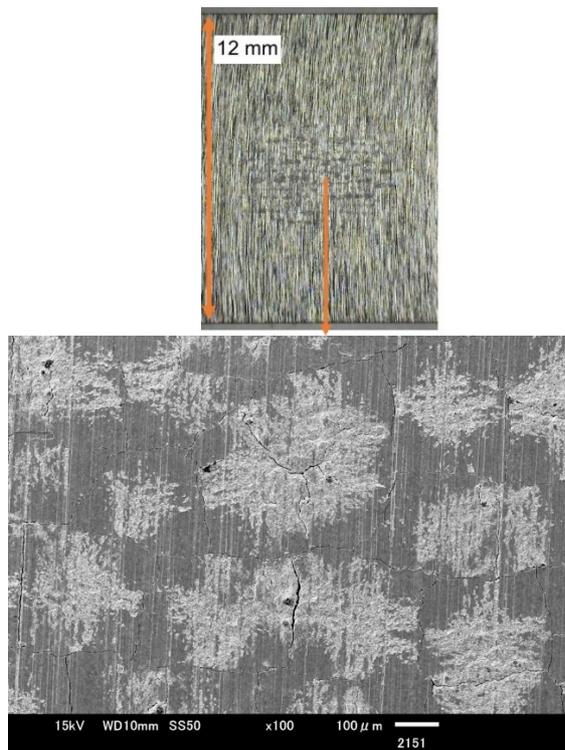


Figure 12: SEM image of a test piece after beam irradiation at beam pulse width of 150 μs .

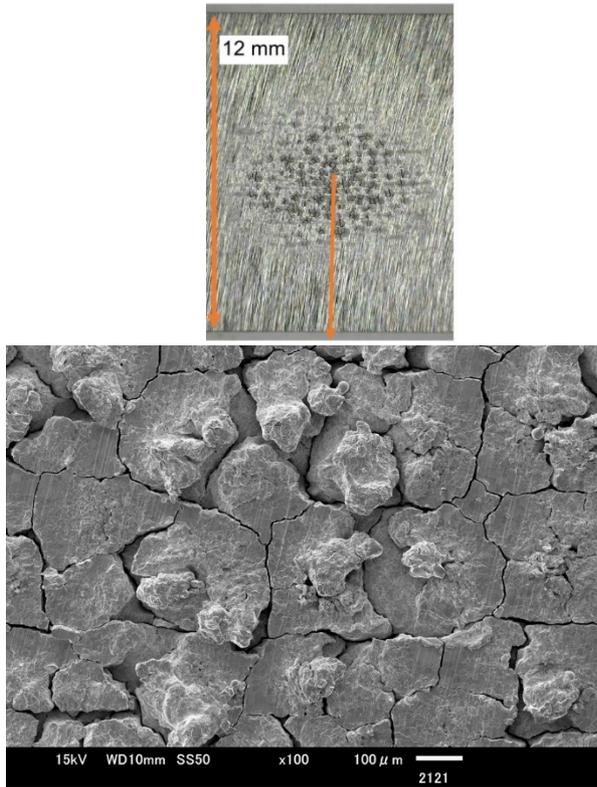


Figure 13: SEM image of a test piece after beam irradiation at beam pulse width of 250 μs .

急激なパルスの熱負荷が繰り返し与えられた場合、加熱中には熱膨張による圧縮変形が起こり、また、冷却中には熱収縮による引張変形が起こる。このため、加熱冷却の温度差が 1600 °C を超える場合には、亀裂や表面の細かな傷の盛り上がり形成されたと考えられる。さらに急激な変化である 2800 °C の場合には、塑性変形がさらに進み、亀裂や突起が成長したと考えられる。

4. まとめ

負水素イオンビームエネルギー 3 MeV の加速器を使用し、イーターグレードタングステンに 5 Hz 周期で加熱及び冷却の温度差を繰り返し与える多重照射試験を実施した。加熱及び冷却の温度差が 2800 °C になる場合には、ピーク温度が照射開始から約 8 時間後から安定し、約 21 時間半後に 3170 °C になった。また、QMS による残留ガスの圧力を測定した結果、プリスターによる水素の突発的な増加やタングステンの残留ガスの増加は観察されなかった。照射後の試験片の SEM 画像には、温度変化を繰り返すことによる膨張収縮より発生した亀裂や突起が観測された。

現在、試験片の断面観察を行い、深さ方向の亀裂について調べている。今回、21 時間半の照射時間を行ったが、今後、さらに長時間の照射試験を行い、亀裂の進展具合について調査する計画である。

謝辞

RF イオン源の運転では、イオン源 Gr に協力を頂きました。クライストロンの運転では、RFGGr に協力を頂きました。タイミング制御やデータ収集に関して制御 Gr に協力を頂きました。電流モニタ校正や各種モニタの調整に関してモニタ Gr に協力を頂きました。3 MeV リニアックの運転や機器設置に関して空洞 Gr に協力を頂きました。

本件は JSPS 科研費 21H01069 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] K. Hirano *et al.*, “Status of 3MeV beam scrapers for the J-PARC linac”, Proc. PASJ2018, Nagaoka, Japan, 2018, pp. 324-328.
- [2] Y. Kondo *et al.*, “Upgrade of the 3MeV linac for testing of accelerator components at J-PARC”, IPAC2019, pp. 960-963.
- [3] K. Hirano *et al.*, “Negative hydrogen ion beam irradiation experiments of beam scrapers using the J-PARC 3MeV linac”, Proc. PASJ2017, Sapporo, Japan, 2017, pp. 847-852.
- [4] K. Hirano *et al.*, “タングステン材料の負水素イオンビームによる多重照射試験 (1) ビームターゲット材料の検討”, 日本原子学会 2022 年秋の大会 (2022/9).
- [5] M. Fukuda *et al.*, “タングステン材料の負水素イオンビームによる多重照射試験 (2) ITER ダイバータ用材料としての評価”, 日本原子学会 2022 年秋の大会 (2022/9).
- [6] K. Tokunaga *et al.*, “タングステン材料の負水素イオンビームによる多重照射試験 (3) 多重照射による材料損傷の観察”, 日本原子学会 2022 年秋の大会 (2022/9).