

J-PARC 核破砕中性子源の陽子ビーム窓材の照射試験

IRRADIATION TEST OF PROTON BEAM WINDOW MATERIAL OF SPALLATION NEUTRON SOURCE IN J-PARC

山口雄司^{#A)}, 明午伸一郎^{A)}, 大久保成彰^{B)}

Yuji Yamaguchi^{#A)}, Shin-ichiro Meigo^{A)}, Nariaki Okubo^{B)}

^{A)} J-PARC Center, Japan Atomic Energy Agency

^{B)} Nuclear Science and Engineering Center, Japan Atomic Energy Agency

Abstract

Irradiation hardening of an aluminum alloy A5083 has been experimentally investigated for stable operation of Japan Spallation Neutron Source (JSNS) in J-PARC. To understand effects of displacement damage and gas production by irradiation, ion irradiation using triple beam of aluminum, helium, and hydrogen ions and indentation testing were performed for an A5083 disc. Martens hardness of the irradiated A5083 disc with the irradiation damage corresponding to that induced during an estimated A5083 lifetime in the JSNS operation was compared with that of the unirradiated disc and showed significant hardening. Further indentation testing for A5083 samples with different irradiation damage levels are needed in future studies.

1. はじめに

大強度陽子加速器施設(J-PARC)[1]の核破砕中性子源(JSNS)[2]は、3 GeV シンクロトロン(RCS)からの 3 GeV 陽子ビームを中性子生成標的に照射して、中性子ビームを物質・生命科学実験施設(MLF)での実験に供給している。RCS からの陽子ビームは Fig. 1 に示すように、3 GeV 陽子ビーム輸送施設(3NBT)[3]の真空ダクトを通り、1 気圧のヘリウム雰囲気中に置かれた標的に入射するため、真空領域とヘリウム雰囲気との隔壁が必要となる。この隔壁の役割を果たすのが陽子ビーム窓(PBW)であり、JSNS の PBW は標的の 1.8 m 上流に設置されている。

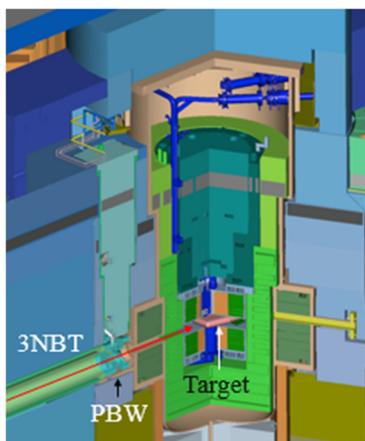


Figure 1: Schematic diagram of Japan spallation neutron source. The 3-GeV proton beam from a rapid cycling synchrotron (RCS) is delivered to the neutron production target in a helium atmosphere through a vacuum beam duct of the 3-GeV RCS to Neutron facility Beam Transport (3NBT) line. The vacuum and helium regions are separated by a proton beam window (PBW).

[#] yamaguchi.yuji@jaea.go.jp

PBW の窓部は、アルミニウム合金 A5083 製で厚さ 2.5 mm の 2 枚の板とそれらで挟まれた幅 3 mm の冷却水流路から構成される。窓部のサイズは幅 360 mm、高さ 220 mm となっており、窓部の A5083 板は Fig. 2 に示すように曲面型構造となっている。この A5083 板は JSNS の運転中、1 MW の大強度陽子ビームや中性子をはじめとする二次粒子によって照射され、原子のはじき出しや核反応に起因したヘリウム、水素生成による照射損傷を受ける。照射損傷による PBW 材の脆化によって窓部が破損すると、長期の運転停止となり得るため、安定した JSNS の運転のためには A5083 に対する照射損傷の影響を理解することが重要となる。

JSNS の PBW 材には当初、アメリカのオークリッジ国立研究所やイギリスのラザフォード・アップルトン研究所で使用実績のあるインコネル 718 が検討されたが、陽子ビームの散乱を低減するため、のちにアルミニウム合金が検討された。A5083 は、スイスのポールシェラー研究所 (PSI) で類似のアルミニウム合金 AIMg₃ が高い放射線耐性を示したことから、JSNS の PBW 材として採用されている。

AIMg₃ は PSI 核破砕中性子源(SINQ)の標的のセーフティハルに用いられている。セーフティハルは直径 ~200 mm、長さ~2 m の二重壁の容器であり、先端にビーム入射窓をもっている。SINQ では使用期間 2 年の間に

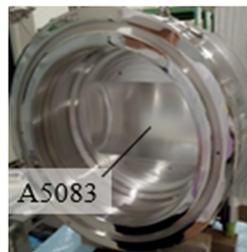


Figure 2: Proton beam window of JSNS. The window has curved plates made of aluminum alloy A5083. The window size is width 360 mm and height 220 mm.

570 MeV 陽子を照射した Target-3 のセーフティハルの使用後、ビーム入射窓から試験片を切り出し、照射後試験がおこなわれた[4]。引張試験の後、走査型電子顕微鏡(SEM)を用いた破断面の観察や透過型電子顕微鏡(TEM)等を用いた微細構造の観察の結果、照射後の試験片には、照射による転移ループの形成とHeやH生成に起因した気泡の形成が観測され、気泡による照射材の脆化と硬化が報告されている。この試験片に対する照射量とHe, Hの濃度は、陽子ビームのピーク強度の位置でそれぞれ3.6 dpa, 1125, 1900 appmであり、これらの情報と照射後試験の結果は、窓材の寿命を見積もるための有用な知見となる。

この知見に基づき、JSNS では粒子輸送シミュレーションによってPBWの寿命を見積もっている[5]。見積もられたPBWの寿命は9500 MWhであり、このときの原子あたりのはじき出し数(DPA)は約4 dpa, He, Hの濃度はそれぞれ~1600, ~3400 appmとなる。しかし、JSNSの陽子ビームのエネルギーはSINQの試験片に照射された陽子ビームエネルギーと異なる。高エネルギー陽子ビームの場合、DPAは小さくなり、He, Hの生成量は大きくなるため、DPAとHe, H生成の陽子ビームエネルギー依存性を正確に反映した寿命の見積もりが必要となる。

3 GeV 陽子照射について正確に寿命を見積もるためには、JSNSのPBWに対して照射後試験をおこなうことが有効であり、使用済みPBWから試験片を採取することはできる。しかし、J-PARCには現状、照射後試験をおこなえる施設は無い。そこで、試料を放射化させずに短時間で照射損傷を導入できる重イオン照射試験を実施している。イオン照射には、DPAだけでなくHe, Hも同時に導入できる設備を有する高崎量子技術基盤研究所のイオン照射研究施設(TIARA) [6]を利用している。

本試験では、A5083についてDPAやHe, Hの生成量に応じた照射の影響を調べることを目的として、A5083に対するイオン照射と押込み試験をおこなう。本稿ではTIARAを利用したA5083の照射試験の現状を報告する。

2. イオン照射

高崎量子技術基盤研究所のTIARAでA5083に対するイオン照射をおこなった。TIARAはAVFサイクロトロン、3 MV タンデム加速器、3 MV シングルエンド加速器、400 kV イオン注入装置の4台の加速器を保有しており、本照射では、AVFサイクロトロンを除く3台の静電加速器を利用した。これらの加速器は、接続されたビームラインを通して各実験ポートにイオンビームを供給できる。MT1ポートはFig. 3に示すように、3台すべての静電加速器からのビームラインが接続されており、トリプルビームを同時に照射できる設備となっている。MT1ポートにおいて重イオンとHe, Hイオンのトリプルビームを試料に照射することで、はじき出し損傷だけでなく、He, H生成の影響も調べることができる。MT1ポートの真空槽には、Fig. 4のような試料台が導入されており、試料ホルダーに複合電解研磨処理したA5083円板を設置した。直径24 mm, 厚さ3 mmのA5083円板は、Fig. 4のけがき線で示された直径~10 mmの口径をもつ円環板で覆われ、中央部にだけイオンを照射できるようになっている。試料

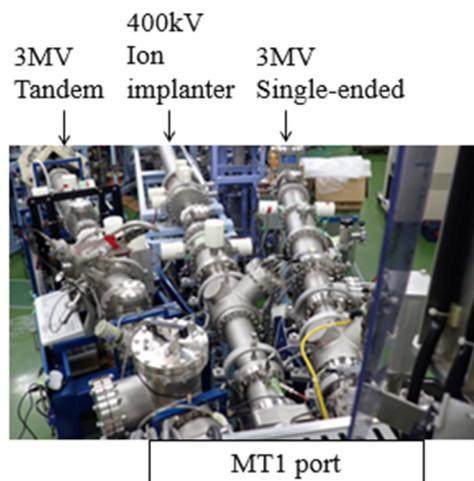


Figure 3: Beamlines for triple beam irradiation at MT1 port. The left, middle, and right beamlines are connected to the 3-MV tandem accelerator, 400-kV ion implanter, and 3-MV single-ended accelerator, respectively. The MT1 port has a vacuum chamber with a stage for samples.

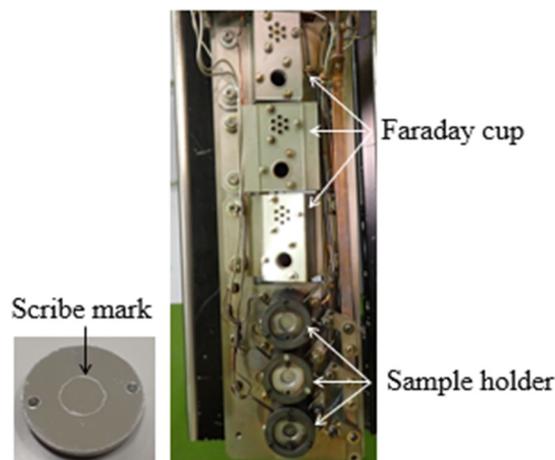


Figure 4: Sample stage at MT1 port and A5083 disc set on sample holder. The stage has three sample holders and Faraday cups for the three accelerators. The A5083 disc has a surface polished by electrochemical buffing. The surface has a scribe mark indicating unmasked region for ion irradiation.

台には、各加速器のビームラインの方向に向けた径の異なる2種類のファラデーカップも設置されており、ビーム電流を測定できるようになっている。

タンデム加速器から10 MeVのAlイオン(Al^{3+})をA5083円板に照射してはじき出し損傷を与えながら、シングルエンド加速器、イオン注入装置からそれぞれ1.05 MeVのHeイオン(He^+), 0.38 MeVのHイオン(H^+)を注入した。SRIMコード[7]で計算した、Alイオンによるはじき出し損傷と注入したHe, HイオンのA5083円板中の深さ分布をFig. 5に示す。He⁺とH⁺の分布は、MT1ポート入口に設置された左右に回転する減速材(Al箔)のため、深さ方向に幅をもっている。A5083円板中心の直径~3 mmの範囲に均一にトリプルビームを照射し、

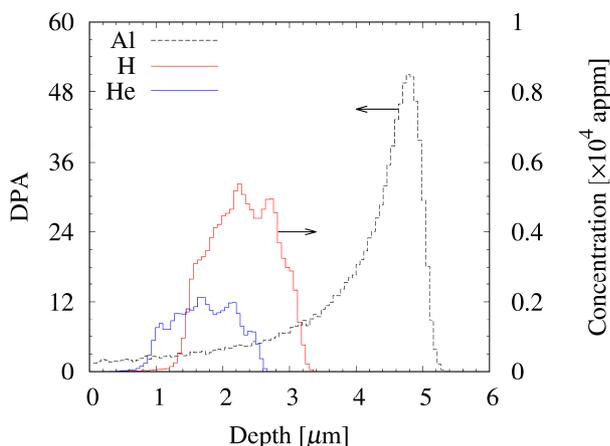


Figure 5: Calculated depth profile of displacement per atom (DPA) and He (blue) and H (red) ion concentrations. The He and H ion distributions have a broad peak by a degrader.

A5083 円板の深さ $\sim 2 \mu\text{m}$ の位置で JSNS の PBW の寿命と同程度の DPA および He, H 濃度とした。このときの DPA と He, H 濃度はそれぞれ約 4 dpa, 1600, 4300 appm である。照射中の A5083 円板の温度は赤外カメラによって測定され、JSNS 運転時の PBW の温度 $\sim 100^\circ\text{C}$ であった。

3. 押し込み試験

イオン照射した A5083 円板に対して、ダイナミック超微小硬度計(島津製作所 DUH-211S)を用いて押し込み試験をおこなった。DUH-211S は、三角錐の圧子を試料に押し込む際の試験力と押し込み深さの関係をリアルタイムに計測でき、表面物性の評価に用いられる。本試験では、計測された試験力 F と押し込み深さ h の関係から次式によりマルテンス硬さ(HM)を求めた。

$$HM = \frac{F}{26.43h^2} \quad (1)$$

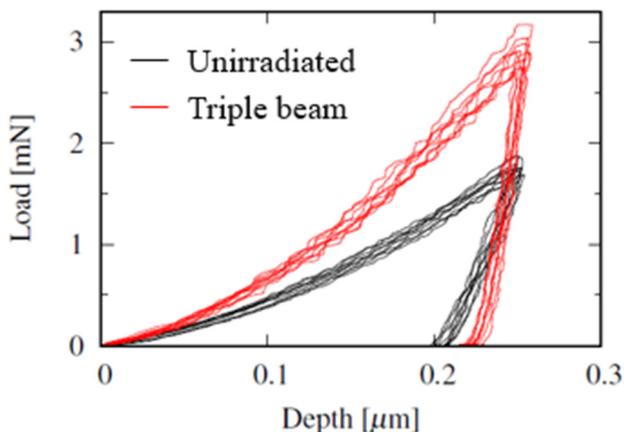


Figure 6: Indentation load-depth curves for triple-beam irradiated (red) and unirradiated (black) regions. Ten typical curves are displayed for each region.

押し込み試験では、押し込み深さの 10 倍程度の深さ領域の影響を受けることが知られているため、 $h = 250 \text{ nm}$ とし、負荷速度については 0.1 mN/s とした。この条件の下、約 100 点で試験した。

押し込み試験で得た典型的な負荷除荷曲線を Fig. 6 に示す。トリプルビーム照射範囲での計測結果を赤線で、非照射範囲での結果を黒線で示してあり、各範囲について 10 点分の計測結果を重ね書きしてある。照射範囲での最大荷重は、押し込み深さにおいて非照射範囲より約 1.5 倍となっている。マルテンス硬さは、照射範囲において $HM = 1717 \pm 67 \text{ N/mm}^2$ 、非照射範囲において $HM = 1068 \pm 47 \text{ N/mm}^2$ であり、有意に硬化を示す。HM とピッカース硬さ(HV)との線形関係[8], HV と引張強さとの線形関係[9]に基づくと、約 1.5 倍の硬化は SINQ の照射後の試験片に対する引張試験[4]において、引張強さが未照射試料の約 1.5 倍であったことと一致する。今後、He, H の注入量による A5083 の硬化等の影響を調べる予定である。

4. まとめ

A5083 について DPA や He, H の生成量に応じた照射の影響を調べるために、TIARA のトリプルビームを用いたイオン照射と押し込み試験をおこなった。トリプルビーム照射による A5083 の硬化を観測した。今後、He, H の注入量を変化させた場合の硬さの調査等を進める予定である。

謝辞

押し込み試験の準備で協力いただいた J-PARC センター中性子源セクションの涌井隆氏に感謝する。

参考文献

- [1] The Joint Project Team of JAERI and KEK, "The Joint Project for High-intensity Proton Accelerators", JAERI-Tech 99-056, 1999, pp. 1-78.
- [2] Y. Ikeda, "J-PARC status update", Nucl. Instrum. Methods A, 600, 2009, pp. 1-4.
- [3] S. Sakamoto *et al.*, "Advanced design of high-intensity beam transport line in J-PARC", Nucl. Instrum. Methods A, 562, 2006, pp. 638-641.
- [4] Y. Dai, D. Hamaguchi, "Mechanical properties and microstructure of AlMg₃ irradiated in SINQ Target-3", J. Nucl. Mater., 343, 2005, pp. 184-190.
- [5] S. Meigo *et al.*, "Radiation damage and lifetime estimation of the proton beam window at the Japan Spallation Neutron Source", J. Nucl. Mater., 450, 2014, pp. 141-146.
- [6] R. Suganuma *et al.*, "2024 Status report of TIARA facility at QST Takasaki", Proc. PASJ2024, Yamagata, Japan, Jul.-Aug. 2024, pp. 1156-1158.
- [7] J. F. Ziegler *et al.*, "SRIM - The stopping and range of ions in matter (2010)", Nucl. Instrum. Methods B, 268, 2010, pp. 1818-1823.
- [8] F. Fadaeifard *et al.*, "Nanoindentation Analysis of Friction Stir Welded 6061-T6 Al Alloy in As-Weld and Post Weld Heat Treatment", Phys. Met. Metallogr., 120, 2019, pp. 483-491.
- [9] S. Sato, T. Endo, "Relation between tensile strength and hardness of aluminum alloys", 軽金属, 36, 1986, pp. 29-35.