

核破碎中性子源施設における陽子ビーム窓とビームモニター及びターゲット容器 の材料試験

Material tests of proton beam window, beam monitor, and target vessel
for spallation neutron source

山口 雄司¹⁾ 直江 崇¹⁾ 大久保 成彰²⁾ 明午 伸一郎¹⁾
Yuji YAMAGUCHI Takashi NAOE Nariaki OKUBO Shin-ichiro MEIGO

¹⁾原子力機構 J-PARC センター ²⁾ 原子力機構 原子力基礎工学研究センター

(概要)

加速器高真空領域と大気圧領域を隔離するビーム窓やターゲット容器の健全性を確保することは、大強度陽子ビームを用いた核破碎中性子源の安定な運転のために重要である。J-PARC 核破碎中性子源(JSNS)の窓材として用いられているアルミニウム合金は、はじき出し損傷や水素、ヘリウムの生成によって脆化や硬化することが知られており、JSNS 機器に対するはじき出し損傷及び水素、ヘリウム生成の影響の理解が必要となる。本研究では、JSNS における陽子ビーム窓及びステンレス製ターゲット容器の照射後の材料特性を調べることを目的として、はじき出し損傷量や水素、ヘリウムの注入等の条件を変えて照射した試料に対し、計装化押し込み試験を実施して照射条件による窓材及びターゲット容器材の硬化の影響を調べた。

キーワード：大強度陽子ビーム，陽子ビーム窓，ターゲット容器，アルミニウム合金，ステンレス

1. 目的

大強度陽子加速器施設(J-PARC)では、物質・生命科学実験施設(MLF)において 3 GeV 陽子を用いて約 1 MW のビーム出力で、パルス核破碎中性子源(JSNS)を運転している。JSNS では加速器高真空領域と大気圧のヘリウムが封入されたターゲットステーションを隔離するため、アルミニウム合金(A5083)製の陽子ビーム窓を用いており、ターゲット材である液体水銀を封入するターゲット容器にはステンレス(SUS316L)を用いている。大強度陽子ビームの安定した運転には、陽子ビーム窓やターゲット容器の健全性の確保が重要であり、陽子や中性子等による構造材料の照射損傷の影響を理解することが重要となる。

陽子ビーム窓材 A5083 は、他の候補材であるインコネルと比べて、陽子ビームの散乱の影響が小さいという利点がある。また、スイスのポールシェラー研究所(PSI)の核破碎中性子源(SINQ)のセーフティハルとしてアルミニウム合金の運用実績があることからアルミニウム合金を採用した。SINQ のセーフティハルでは、照射後のアルミニウム合金から試験片を加工し、すでに照射後試験が行われている。照射後の SINQ の試験片には、はじき出し損傷に伴う転移ループの形成と共に、ヘリウム生成によるバブルが観測され、水素 H、ヘリウム He 生成による脆化、硬化を示唆する延性の低下が報告されている[1]。JSNS では SINQ の照射後試験結果に基づき、陽子ビーム窓の寿命を 2 年と決定した[2]。ただし、SINQ は 600 MeV 陽子を用いており、JSNS の陽子エネルギー 3 GeV と異なるため、エネルギーの違いによる評価が必要となる。ターゲット容器構造材 SUS316L についても、SINQ やオークリッジ国立研究所の核破碎中性子源(SNS)における照射後試験結果[3,4]に基づき、ターゲット容器の寿命を積算照射量 10 dpa までとしているが、3 GeV 陽子による照射データが無く、エネルギーの違いによる評価が必要である。JSNS の照射後の構造材から試験片を採取することは可能だが、法規上の問題で照射後試験を行うことができない。

本研究では、大強度陽子ビーム施設におけるアルミニウム合金製陽子ビーム窓とステンレス製ターゲット容器の照射後の材料特性を調べることを目的として、A5083 及び SUS316L にトリプルビームを照射した。Al, H, He イオンを A5083 に照射した結果と Ni, H, He イオンを SUS316L に照射した結果について報告する。

2. 実施方法

MT1 ポートにおいて、陽子ビーム窓材 A5083 と水銀ターゲット容器構造材 SUS316L にイオン照

射した。A5083 試料のサイズは直径 24 mm, 厚さ 3 mm であり, 中心の直径 3 mm が照射範囲である。A5083 試料に対しては, タンデム加速器からの 10 MeV の Al イオンと同時にイオン注入装置からの 0.38 MeV の H イオンとシングルエンド加速器からの 1.05 MeV の He イオンをトリプル照射した。試料の深さ 2 μm の位置で, JSNS の陽子ビーム窓と同程度のはじき出し損傷 4 dpa, H 濃度~3400 appm となり, 約 2 倍の He 濃度~3200 appm となるようにビーム電流を決めた。図 1 に SRIM コード[5]を用いて計算したはじき出し損傷および H, He 濃度の深さ分布を示す。H, He イオンの照射時には, ビーム軸に垂直に設置した Al 箔を回転させることで H, He イオンのエネルギーを変化させ, 深さ方向に幅をもつ濃度分布となるようにした。SUS316L では, タンデム加速器からの 14 MeV の Ni イオン, イオン注入装置からの 0.38 MeV の H イオンとシングルエンド加速器からの 1.05 MeV の He イオンを用いて水銀ターゲットの 2 年運転時の陽子及び中性子による損傷を模擬して深さ 1 μm で~7 dpa, H 濃度~24000 appm, He 濃度~4200 appm になるようにトリプル照射した。図 2 に SRIM によるはじき出し損傷及び H, He 濃度の深さ分布の計算結果を示す。A5083 照射時と同様に, H, He ビーム軸上の厚さ 0.8 mm のアルミニウム箔をスイングさせて深さ方向の濃度分布を分散させた。A5083, SUS316L の照射温度については赤外カメラで測定し, それぞれ陽子ビーム窓, 水銀ターゲット運転時の温度 100, 200°C程度とした。

イオン照射後, JAEA の東海地区でベルコビッチ圧子を用いた計装化押し込み試験を実施した。A5083 照射試料に対しては負荷速度を 0.1 mN/s, 押し込み深さを 250 nm とし, 40 μm ピッチで 5×10 の合計 50 点で試験してマルテンス硬さ(HM)を得た。SUS316L に対しては照射領域及びマスキングした非照射領域に対して, マイクロインデンテーション試験を実施し, 荷重-深さ曲線からマルテンス硬度を導出した。インデンテーションでは, 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を考慮して, 最大押し込み深さ及び深さ速度はそれぞれ, 0.15 μm 及び 0.5 μm, 0.1463 mN/sec 及び 1.67 mN/sec とした。

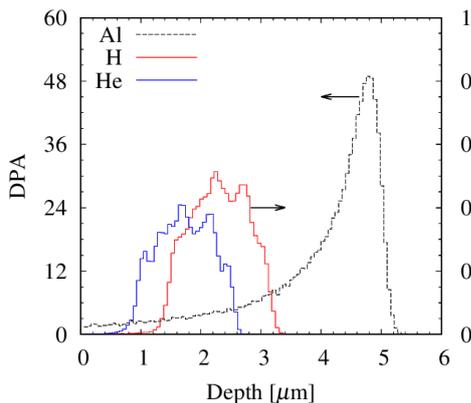


図1 A5083 試料のはじき出し損傷及び H, He 濃度の深さ分布

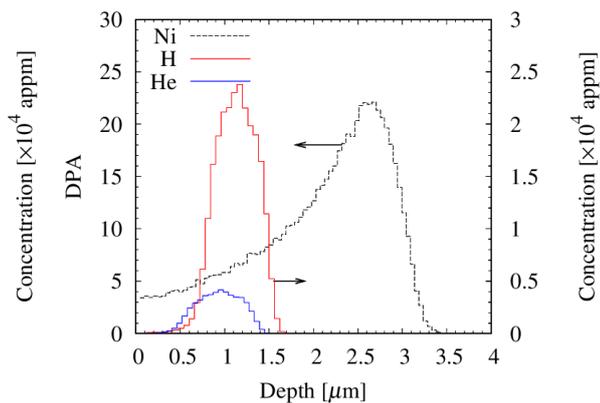


図2 SUS316L 試料のはじき出し損傷及び H, He 濃度の深さ分布

3. 結果及び考察、今後の展開等

図 3 に 2023 年度 (黒線) と今年度 (赤線) の A5083 トリプル照射試料の典型的な荷重変位曲線を示す。2023 年度では, JSNS の陽子ビーム窓と同程度のはじき出し損傷及び H, He 濃度としたのに対し, 今年度では, はじき出し損傷と H 濃度を変えずに He 濃度を 2 倍とした。押し込み深さにおける荷重は, 今年度と 2023 年度とでほとんど変わらない。マルテンス硬さを比較すると, 今年度では $1742 \pm 55 \text{ N/mm}^2$, 2023 年度では $1717 \pm 67 \text{ N/mm}^2$ と誤差の範囲で一致しており, 硬化は観測されなかった。

図 4 に SUS316L の最大深さ 0.5 μm における荷重-深さ曲線を示す。15 回の試験のデータを重ね書きし

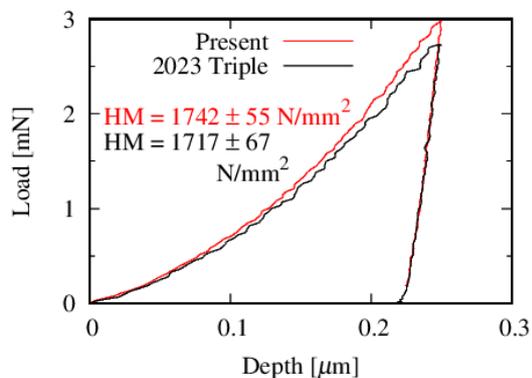


図3 A5083 試料の荷重変位曲線

たものであるが、照射領域の荷重が高く照射によって硬化していることが分かる。図中にマルテンズ硬度 HM を示すが、照射領域は 28%高い。なお、深さ $0.15\ \mu\text{m}$ では、照射領域が $\text{HM}=6318\pm 453\ \text{N/mm}^2$ 非照射領域が $\text{HM}=4240\pm 120\ \text{N/mm}^2$ であり、照射によって 44%上昇していた。深さ方向に対する硬度分布を評価するために、図 4 に示した荷重-深さ曲線を照射、非照射領域ごとに平均化し、荷重/深さ-深さ曲線を導出した結果を図 5 に示す。荷重/深さ-深さ曲線は、深さ方向に対する押し込み抵抗であり、硬度と良い相関があることが知られている。非照射領域では、負荷過程における荷重/深さ-深さ曲線の傾きが直線的であり、深さ方向に硬さの変化がないのに対して、照射領域では深さ約 $0.15\ \mu\text{m}$ までは傾きが大きく、約 $0.15\ \mu\text{m}$ から $0.3\ \mu\text{m}$ の範囲で傾きが段階的に緩やかになり、 $0.35\ \mu\text{m}$ 以上では非照射領域とほぼ同等の傾きとなり、荷重深さ曲線が深さ方向の 10 倍程度の材料特性の影響を受けることから、図 2 に示した深さ $1.5\ \mu\text{m}$ までのトリプル照射領域及び深さ $3.5\ \mu\text{m}$ までの Ni の分布と対応している。

今後、深さ分布を考慮した解析モデルにより逆解析的に材料定数を評価することを試みることに加えて、Ni イオンのみ、H, He の注入量を変えたトリプル照射との比較検討により H, He の影響を評価する。

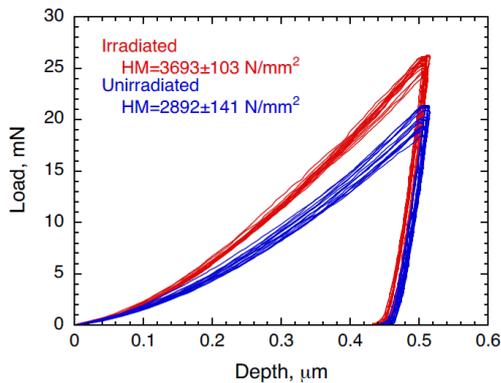


図 4 SUS136L の荷重-深さ曲線

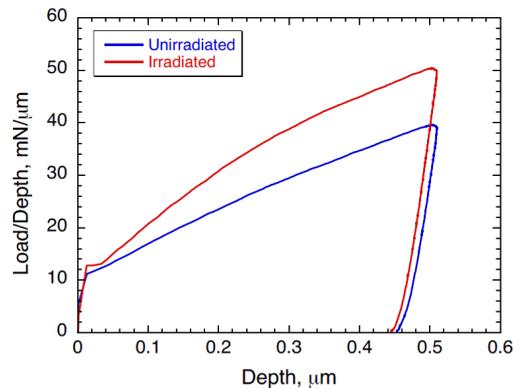


図 5 SUS316L の荷重/深さ-深さ曲線

4. 引用(参照)文献等

- [1] Y. Dai, D. Hamaguchi, J. Nucl. Mater. 343, 184 – 190 (2005).
- [2] S. Meigo et al., J. Nucl. Mater. 450, 141 – 146 (2014).
- [3] Y. Dai et al., J. Nucl. Mater. 377, 109 – 114 (2008).
- [4] D. A. McClintock et al., J. Nucl. Mater. 545, 152729 (2021).
- [5] J. F. Ziegler et al., Nucl. Instr. Meth. B 268, 1818 – 1823 (2010).