

核破碎中性子源施設における陽子ビーム窓の材料試験

Material test of proton beam window of spallation neutron source facility

山口 雄司¹⁾ 明午 伸一郎¹⁾ 中野 敬太¹⁾ 大久保 成彰²⁾ 大井 元貴¹⁾
Yuji YAMAGUCHI Shin-ichiro MEIGO Keita NAKANO Nariaki OKUBO Motoki OOI

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いる。本研究では、核破碎中性子源におけるアルミニウム合金製陽子ビーム窓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照射条件を変えて照射した試料に対してナノインデンテーション試験を実施し、照射条件による窓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，アルミニウム合金，硬化

1. 目的

日本原子力研究開発機構(JAEA)の J-PARC センターでは、物質・生命科学実験施設(MLF)において 3 GeV 陽子を用いた核破碎中性子源(JSNS)の、約 1 MW という大強度ビームによる運転をおこなっている。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、大強度陽子ビームの安定した運転には、陽子ビーム窓の健全性の確保が重要であり、放射線による劣化等の影響を理解することが重要となる。

陽子ビーム窓材として用いているアルミニウム合金と同様な材料は、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用いられている。他の候補となる窓材(インコネル)と比べ、陽子ビームの散乱の影響が小さいため、JSNS では SINQ のセーフティハルを参考にアルミニウム合金を採用した。SINQ のセーフティハルにおいては、照射後のアルミニウム合金から試験片を作成し、照射後試験を既におこなっており、試験結果が報じられている[1]。照射後の SINQ の試験片では、転移ループと共にヘリウム生成によるバブルが観測され、弾き出し損傷に伴い、延性が低下し脆くなることが観測されており、水素 H、ヘリウム He 生成による脆化、硬化が示唆されている。

JSNS では、SINQ セーフティハルと同等なアルミニウム合金である陽子ビーム窓材について、SINQ の照射後試験結果より寿命を 2 年と決定した[2]。ただし、JSNS では運動エネルギー 3 GeV の陽子を用いており、SINQ の陽子エネルギー 600 MeV 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。

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の照射後の材料特性を調べることを目的とする。Al イオン単独ビームおよび Al, H, He イオンのトリプルビームを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、JSNS 陽子ビーム窓材であるアルミニウム合金 A5083 にイオン照射した。照射試料のサイズは、直径 24 mm、厚さ 1 mm であり、中心の直径 3 mm が照射範囲である。タンデム加速器からの 10 MeV の Al イオンを用いて、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 と、比較のため 1 dpa となるように照射した。また、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 イオンを用いて、陽子ビーム窓と同程度の損傷、H 濃度~3400 appm、He 濃度~1600 appm となるようにトリプル照射した。図 1 に SRIM コード[3]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。

イオン照射後、JAEAの東海地区でナノインデンテーション試験を実施した。負荷速度を0.1 mN/s、押し込み深さを250 nmとし、ベルコビッチ圧子によりダイナミック硬さを得た。各照射条件で照射した試料および未照射の試料に対して、10回試験をおこなった。

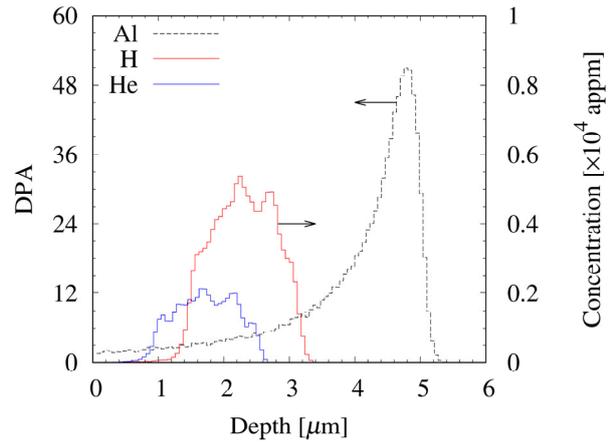


図1 はじき出し損傷およびH, He濃度の深さ分布

3. 結果及び考察、今後の展開等

高崎研でAlイオンおよびAl, H, Heイオンを照射後、JAEA東海地区でナノインデンテーション試験を実施した。図2に未照射試料および各条件での照射試料の典型的な荷重変位曲線を示す。イオン照射によって押し込み深さにおける荷重は、約1.7倍となり照射試料の硬化を観測した。Alイオン単独照射試料間では押し込み深さにおける荷重は、10%程度の差異であり、Alイオン単独照射とトリプル照射試料間においては、明確な荷重の差異は観測されなかった。

図3に、各試料への荷重と押し込み深さとから求めたダイナミック硬さを示す。Alイオン単独、トリプル照射ともにイオン照射した試料は硬化しており、SINQの照射後試験の報告[1]と矛盾しない。Alイオン単独で照射量を4倍変化させた場合では、4 dpa照射した試料の方が硬くなる傾向を示しており、はじき出し損傷の増加による硬化も観測された。HとHeイオン照射の有無を変えた場合では、トリプル照射の試料とAlイオン単独照射の試料の硬さ値は、誤差の範囲で一致し、Daiらによる指摘[1]を支持しない。今後、試料状態をより詳細に検討した上で再現実験が必要と考える。また、H, Heイオンの照射量を変化させた場合のデータ取得も進めたい。

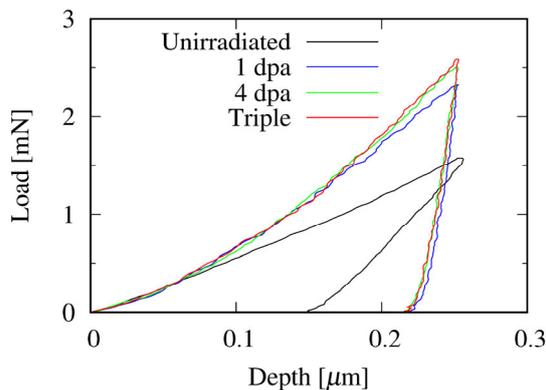


図2 荷重変位曲線

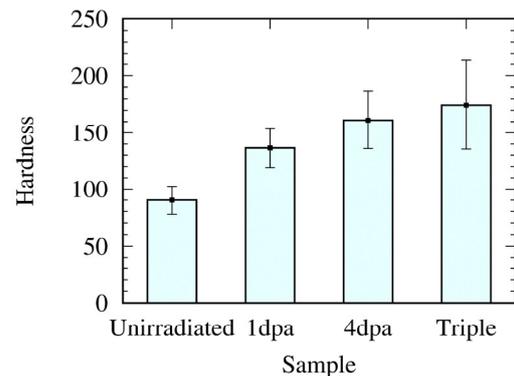


図3 ダイナミック硬さ

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] J. F. Ziegler et al., Nucl. Instr. Meth. B 268, 1818 – 1823 (2010).