課題番号 <u>2023A-C11</u>

利用区分成果公開(学術)

核破砕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 test of proton beam window, beam monitor, and target vessel of spallation neutron source facility

山口 雄司 1)	明午 伸一郎	涌井 隆 1)	大久保 成彰 2)	大井 元貴 1)
Yuji YAMAGUCHI	Shin-ichiro MEIGO	Takashi WAKUI	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砕中性子源の安定な運転のために重要である。J-PARC 核破砕中性 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、ナノインデンテーション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。

<u>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</u>

<u>1. 目的</u>

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 陽子を用いた核破砕中性子源(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、またターゲット容器 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、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)の核破砕中性子源(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。JSNS の照射 後の陽子ビーム窓は試験片となり得るが、法規上の問題で照射後試験を行うことができない。この問題は SUS316L についても同様である。

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する。Al, H, He イオンのトリプルビームを A5083 に照射した結果とNi イオン単独ビーム及びNi, H, He イオンのトリプルビームを SUS316L に照射した結果ついて報告する。

<u>2. 実施方法</u>

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 とターゲット容器材 である 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, SUS316L 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。A5083 試料に対

課題番号	2023A-	·C11
利用区分	成果公開	(学術)

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損傷 4 dpa, 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。SUS316L 試料に対しては、試料の深さ 1 µm の位置で、 はじき出し損傷が約 5 dpa となるように、タンデム加速器からの 12 MeV の Ni イオンを 2 個の試料(S1, S2) に照射し、一方の試料 S1 については、12 MeV の Ni イオンと同時に 0.38 MeV の H イオンと 1.05 MeV の He イオンを照射して水銀ターゲット容器窓部と同程度のガス生成率~800 appm H/dpa, ~200 appm He/dpa と なるようにトリプル照射した。図 2 に SRIM コードで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。照射温度については赤外カメラで測定し、A5083 照射では陽子ビーム窓使用時の温度 100℃を超 えない温度とし、SUS316L 照射では 200℃を超えない温度とした。

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。A5083 試料に対し ては負荷速度を 0.1 mN/s, 押込み深さを 250 nm とし, ベルコビッチ圧子によりマルテンス硬さを得 た。照射試料および未照射の試料に対して, 40 µm ピッチで 12×10 の合計 120 点で試験した。SUS316L 試料に対しては最大押込み深さを 0.15 µm 及び 0.50 µm とし, 各押込み深さ条件でのビッカース硬 度に相当する硬さを算出した。各照射条件で照射した試料において, 未照射部及び照射部に対して, 20 点試験した。









3. 結果及び考察、今後の展開等

図3にA5083の未照射試料およびトリプル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。この結果は前回 の照射で得た結果と矛盾しない。

図4に、A5083 試料への荷重と押込み深さとから求めたマルテンス硬さを示す。トリプル照射した試料 は硬化しており、SINQ の照射後試験の報告[1]と矛盾しない。今回の照射実験では、前回より高い精 度で試料の硬さを得ることができた。これはナノインデンテーション試験における試験点を前回よ り約 10 倍に増やしたことと試料の表面粗さを複合電解研磨によって改善させたことに起因すると 考えることができる。今後、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5及び図6にSUS316Lの各照射試料の未照射部及び照射部に対する典型的な荷重-深さ曲線を示 す。照射に伴い、荷重の増加がみられる。そこで、荷重-深さ曲線から硬さを算出し、図7に示すように、 非照射部を基準とした硬さの増加量を算出した。0.15 µm での硬さの増加量より、0.50 µm での硬さの増加 量が小さくなっており、照射領域の下側の非照射領域の影響が含まれた可能性がある。また、各照射試料に おいて、Ni 単独照射した試料より、トリプル照射した試料の方が、わずかに硬さの増加量が大きいが、ト リプル照射した試料の弾き出し損傷が約0.4 dpa 大きくなっており、H 及び He の影響の有無を明確にする ために、今後もデータの取得を進めたい。





図4 マルテンス硬さ. 未照射試料, 前回(2021 年度)のトリプル照射試料,今回のトリプル照 射試料の硬さが不確かさとともに示されてあ る.





図 7 非照射部を基準とした硬さの増加量

引用(参照)文献等 4.

- Y. Dai, D. Hamaguchi, J. Nucl. Mater. 343, 184 190 (2005). [1]
- S. Meigo et al., J. Nucl. Mater. 450, 141 146 (2014). [2]
- [3] J. F. Ziegler et al., Nucl. Instr. Meth. B 268, 1818 1823 (2010).

0.6