二元系 W 合金の重イオン照射特性

Responses of Binary Tungsten Alloys to Heavy Ion Irradiation

*波多野雄治 [1]，汪 京 [1]，外山 健 [2]，檜木達也 [3]，藪内聖皓 [3]
[1] 富山大学, [2] 東北大学, [3] 京都大学

W および W-0.3Cr，W-2.5Mo，W-5Ta，W-5Re 合金に 800℃で 0.26 dpa まで 6.4 MeV Fe イオンを照射した。W-0.3Cr および W-5Re では陽電子寿命はほとんど変化しなかったが，析出物が形成された。照射硬化の程度は W-5Ta > W ≈ W-2.5 Mo ≈ W-0.3Cr > W-5Re であった。Cr および Re の添加による空孔型欠陥濃度の減少が機械的性質をも改善する可能性があるものの，Cr では Re 以上に析出硬化に注意が必要であると結論した。

キーワード，ダイバータ，タングステン，照射効果，合金化

1. 緒言　核融合炉プラズマ対向材料であるタングステン（W）が中性子照射を受けると，格子欠陥による捕捉効果によって高濃度にトリチウム（T）が吸蔵される可能性がある。そこで我々は，合金化によって照射効果を抑えるための研究を進めている。これまでに，W に Cr や Re を添加すると照射後の水素同位体吸蔵量が大きく減少すること，Ta や Mo ではそのような効果は見られないことを報告してきた [1-3]。しかし，微細組織や機械的特性に関する知見は得られていなかった。そこで本研究では，W および W 系二元系合金に Fe イオンを照射したうえで，硬さの変化および合金元素の析出挙動を調べた。

2. 実験　試料には W および W-0.3Cr，W-2.5Mo，W-5Ta，W-5Re 合金の板材 (10×10×0.5 mm) を用いた。表面を鏡面に仕上げたのち，真空中にて 1000 ℃で 1 時間加熱することで加工歪と不純物水素を除去した。そののち，京都大学の加速器 DuET を用いて 6.4 MeV Fe イオンを 800℃で 0.26 dpa まで照射した。空孔および空孔クラスタの形成挙動を調べるため，^{22}Na 線源を用いて照射後の陽電子寿命を測定した。また，合金元素の析出の有無を 3 次元アトムプローブ法で，照射損傷領域の硬さの変化をナノインデンテーション法で調べた。なお，Suzudo らの第一原理計算により，Cr，Mo，Re は W 中の自己格子間原子と引力的に相互作用し，結合エネルギーの大きさが Cr > Re > Mo であること，Ta は斥力的に相互作用することがわかっている [4]。

3. 結果および考察　Fe イオン照射後の陽電子寿命は，W-5Ta (175 ps) ≈ W (174 ps) ≈ W-2.5 Mo (170 ps) >> W-0.3Cr (141 ps) ≈ W-5Re (139 ps) であり，W 自己格子間原子と強く引力的相互作用をする Cr および Re を添加した場合に著しく短い値を示した。これは，Cr および Re が W 自己格子間原子の拡散挙動に影響を与えることで，自己格子間原子と空孔との再結合が促進されたためである。一方で，照射硬化の程度は W-5Ta > W ≈ W-2.5 Mo ≈ W-0.3Cr > W-5Re の順であり，空孔型欠陥の形成が抑制された W-0.3Cr および W-5Re で比較的小さかった。これらの結果は，本実験条件下において空孔および空孔クラスタの形成が照射硬化に寄与していることを示唆している。一方で，W-5Ta および W-2.5Mo 中では合金元素の照射誘起析出は見られなかったが，W-0.3Cr では図 1 に示すように Cr の析出が生じた。W-5Re でも Re の析出が見られたが，析出物密度ははるかに低かった。以上のことから，W-Cr 合金では空孔型欠陥の形成は強く抑制されるものの，より高い照射量では析出物形成により機械的特性が劣化する可能性があることがわかった。

図 1　800℃で Fe イオン照射した W-0.3Cr 中の Cr 分布の一例

[1] Y. Hatano et al., Nucl. Mater. Energy 9 (2016) 93-97, [2] J. Wang et al., J. Nucl. Mater. 545 (2021) 152749,
[3] J. Wang et al., J. Nucl. Mater. 559 (2022) 153449, [4] Suzudo et al., J. Nucl. Mater. 505 (2018) 15–21.

*Yuji Hatano[1], Jing Wang[1], Takeshi Toyama[2], Tatsuya Hinoki[3] and Kiyohiro Yabuuchi[3]
[1]Univ. of Toyama, [2]Tohoku Univ., [3]Kyoto Univ.