

原子炉容器鋼の照射ミクロ組織変化への個別元素の影響

Effects of solute elements on microstructural change in ion-irradiated RPV model alloys

*藤井 克彦, 福谷 耕司

原子力安全システム研究所

原子炉容器鋼のモデル合金を Fe イオンで損傷量 5 dpa まで照射して照射硬化を調べるとともに、アトムプローブ (APT) 測定によりミクロ組成分布を調べ、個別元素の影響を検討した。Mn を含まない合金では大きく硬化は抑制された。Si 添加は硬化を抑制する傾向があり、溶質原子クラスタ形成への影響と一致した。

キーワード：原子炉容器鋼, 照射脆化, アトムプローブトモグラフィ, 溶質原子クラスタ

1. 緒言

低合金鋼の照射脆化因子として溶質原子クラスタやマトリックス損傷の形成が考えられており、照射脆化機構の解明にはミクロ組織を把握してそれらの硬化への寄与度を明らかにすることが重要である。しかし、形成するクラスタに対する材料組成や照射条件の影響は必ずしも明らかでなく、クラスタを構成する個別元素の役割もよく分かっていない。Fe-Mn 合金において顕著な照射硬化が確認されるなど Mn の効果は重要であると考えられるが、日本国内の軽水炉プラントで使用されている原子炉圧力容器鋼の Mn 含有量はほぼ 1.5wt% でプラント毎も違いは小さい。Cu を高濃度含む材料については Ni 濃度が高いほど Cu リッチクラスタのサイズは小さくなるのに対して数密度は高くなり体積率も増加することが Ni 影響として知られている。しかし、Cu をほとんど含まない材料での Ni や Si の影響については必ずしも明確ではない。そこで、Cu 濃度の低い原子炉容器鋼の化学組成を中心にして個別元素の添加量を変化させたモデル合金に対して Fe イオン照射を行い、個別元素の影響の検討を実施している。本報告では高照射領域までの照射硬化に対する個別元素の影響を中心に報告する。

2. 方法

低 Cu 濃度の低合金鋼の化学組成を模した Fe 基モデル合金 (Fe-1.5Mn-0.5Ni-0.25Si-0.05Cu) をベースに作製したモデル合金 (Fe-Mn-Ni-Si-Cu, Fe-Mn-Ni-Si, Fe-Mn-Si, Fe-Ni-Si, Fe-Mn-Ni) と、Fe-1.5Mn 合金に Ni を 0, 1.0, 2.0wt%, Si を 0, 0.5, 1.0wt% 個別に添加したモデル合金を用いた。照射は京都大学 DuET で行い、6.4 MeV Fe イオンを 290℃ で照射した。はじき出しエネルギー $E_d = 40$ eV とした場合の 600 nm 深さにおける損傷速度は $1 \sim 3 \times 10^{-4}$ dpa/s であり、損傷量は最大 5 dpa である。次に、押込み深さを 300 nm に制御したナノインデンテーションで損傷領域の硬さを測定した。また、600 nm 深さを APT 測定用の試料に集束イオンビームで加工して APT 測定を行い、ミクロ組成分布を評価した。

3. 結論

照射後すべての合金で硬化した。Mn が未添加の Fe-Ni-Si 合金で硬化は小さく、Ni もしくは Si が未添加の Fe-Mn-Ni, Si 合金で大きくなった。また、Fe-Mn-Ni-Si-Cu 合金と Fe-Mn-Ni-Si 合金は同様な硬化を示し、0.05wt% の Cu の添加は本照射条件では硬化に大きく影響しないことが分かった。なお、これらの合金は 2 dpa まで Fe-Ni-Si 合金と同様な照射硬化挙動を示し、Ni, Si, Cu の複合添加が Mn の影響を抑制することが示唆された。Ni 添加の影響に関しては、1.0wt% までは硬化にあまり影響しないが、2.0wt% では逆に減少する傾向を示した。また、Si 添加の影響に関しては、Si 濃度の増加に伴い減少する傾向が認められた。APT 測定の結果、Si 濃度が高くなるほど、Mn クラスタの形成が抑制される傾向が確認された。

*Katsuhiko Fujii and Koji Fukuya
Institute of Nuclear Safety System, Inc.