

## Fe-Mn-(Ni, Si)合金の照射ミクロ組織変化

Solute cluster formation of ion-irradiated Fe-Mn-(Ni, Si) alloys

\*藤井 克彦, 福谷 耕司

原子力安全システム研究所

Fe-1.5Mn 合金をベースに Ni, Si を添加したモデル合金を Fe イオン照射して照射硬化を調べるとともに、アトムプローブ測定により溶質原子クラスタの形成を調べた。Ni 添加は硬化を促進し Si 添加は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形成する Mn-Ni-Si クラスタに対する Ni や Si の影響については必ずしも明確ではない。そこで本研究では、Fe-1.5Mn 合金をベースに Ni, Si を添加したモデル合金を Fe イオン照射して照射硬化とミクロ組織変化を調べ、Ni, Si の影響を検討した。

### 2. 方法

Fe-1.5Mn 合金に Ni を 0, 0.5, 1.0, 2.0wt%, Si を 0, 0.25, 0.5, 1.0wt% 個別に添加した 7 種類のモデル合金と、Ni と Si を複合添加した合金 (Fe-1.5Mn-0.5Ni-0.25Si, Fe-1.5Mn-0.5Ni-0.25Si-0.05Cu) を、東京大学重照射研究設備 (HIT) で 3 MeV Fe<sup>2+</sup> イオンを 290°C 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 300 nm 深さにおける損傷速度は  $1 \times 10^{-4}$  dpa/s であり、損傷量は最大 1 dpa である。次に、押込み深さを 150 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、300 nm 深さをアトムプローブ (APT) 測定用の試料に集束イオンビーム (FIB) で加工して APT 測定を行い、溶質原子クラスタの形成を評価した。

### 3. 結論

照射後すべての合金で硬化した。Ni 添加の影響に関しては、1.0wt% まではわずかに増加したが、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。また、Ni と Si が添加された場合には硬化量が小さくなる複合効果が認められ、0.05wt% の Cu の添加は硬化を促進する傾向が認められた。APT 測定の結果、Fe-1.5Mn 合金では Mn クラスタが形成し、Ni を含む合金では Mn-Ni クラスタが形成していることが確認された。Ni 濃度が高いほどクラスタのサイズは小さくなるのに対して、数密度は高くなる傾向が認められた。Mn-Ni クラスタにおいても Cu リッチクラスタと同様な Ni 影響が示唆された。また、Fe-1.5Mn 合金と Fe-1.5Mn-1.0Si 合金で比較すると、Mn クラスタについては Si を含まない方がより明確な形成が確認された。これは Si の添加が Mn クラスタの形成を抑制する影響があることを示唆する。Fe-Mn 合金系における溶質原子クラスタ形成への Ni と Si の影響と硬さの変化への影響が相関することが確認された。

---

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