

中性子照射ステンレス鋼中の溶質原子クラスタの硬化係数の検討

Hardening factor of solute atom clusters in neutron-irradiated stainless steels

*藤井 克彦¹, 福谷 耕司¹

¹原子力安全システム研究所

中性子照射ステンレス鋼の APT 測定結果と TEM 観察結果を比較し、溶質原子クラスタと照射欠陥クラスタの関係とその硬化への寄与を検討した結果、Ni-Si クラスタはキャビティやブラックドット等への偏析、Ni-Si-Mn クラスタは TEM で観察される析出物もしくはその前駆体であると考えられた。この仮定のもとでは、Ni-Si-Mn クラスタの硬化係数は 0.2 となり、ブラックドットやキャビティと同じ程度の強度を持つ。

キーワード：照射硬化、ステンレス鋼、溶質原子クラスタ、照射欠陥クラスタ、硬化係数

1. 緒言

軽水炉内構造物材料として使用されるオーステナイトステンレス鋼の中性子照射によるマイクロ組織変化やマイクロ組成変化は照射誘起応力腐食割れの発生や靱性の低下を引き起こす。このため、主として透過型電子顕微鏡(TEM)による評価が行われ、マイクロ組織変化に関しては転位ループやブラックドット、キャビティ、析出物の形成について多くの報告がなされている。近年、原子レベルの空間分解能を有する質量分析法である APT 分析が中性子照射材やイオン照射材に対して試みられ、溶質原子クラスタの形成が報告されつつある。しかし、溶質原子クラスタと TEM で観察される損傷組織との関係や溶質原子クラスタの硬化への影響は必ずしも明らかになっていない。そこで、本研究では、中性子照射された冷間加工 316 ステンレス鋼および 304 ステンレス鋼を APT 測定して得られた溶質原子クラスタのデータと TEM 観察による損傷組織を比較して、溶質原子クラスタと照射欠陥クラスタの関係とその硬化への寄与を検討した。

2. 方法

供試材は国内軽水炉で照射された冷間加工 316 ステンレス鋼および海外軽水炉で照射された溶体化 304 ステンレス鋼である。316 鋼の材料組成(wt%)は Fe-0.04C-0.62Si-1.63Mn-0.022P-0.006S-12.6Ni-16.94Cr-2.22Mo であり、照射量と照射温度はそれぞれ 3/323、11/323、35/313、53/304、74dpa/305°Cである。また、304 鋼の材料組成(wt%)は Fe-0.060C-0.78Si-0.96Mn-0.011P-0.003S-9.3Ni-18.6Cr であり、照射量と照射温度は 38dpa/328°Cである。APT 測定で得られた溶質原子クラスタを大きさで分けて、TEM で観察されるフランクループ、ブラックドット、キャビティ、析出物と大きさと数密度を比較した。また、溶質原子クラスタと照射欠陥クラスタの平均直径(d_k)と数密度(N_k)を用いて、 $\Delta\sigma_k = \alpha_k M\mu b(N_k d_k)^{1/2}$ の関係から硬化量を算出して測定値と比較し、硬化係数(α_k)を検討した。なお、 $M\mu b$ は定数である。

3. 結論

溶質原子クラスタのうち Ni-Si クラスタはキャビティやブラックドット等への偏析、Ni-Si-Mn クラスタは TEM で観察される析出物もしくはその前駆体であると考えられた。316 鋼および 304 鋼について、フランクループ(硬化係数 0.4)、ブラックドット(0.2)、キャビティ(0.2)及び Ni-Si-Mn クラスタ(0.2)で硬化量を算出した結果、測定値と良い一致を得た。析出物と想定される Ni-Si-Mn クラスタの硬化係数は 0.2 と評価され、ブラックドットやキャビティと同じ程度の強度を有する硬化因子であると考えられる。さらに、Ni-Si-Mn クラスタの形成は照射量の増加に伴い促進されるため、高照射量ではフランクループと同程度の硬化への寄与となる。

*Katsuhiko Fujii¹, Koji Fukuya¹ ¹Institute of Nuclear Safety System