

炭素鋼の低温照射下での脆化挙動

A study of low-temperature irradiation embrittlement of carbon steel

*三浦照光¹、藤井克彦¹、福谷耕司¹、川久保政洋²

¹原子力安全システム研究所、²原環センター

炭素鋼 (0.01%Cu) に 90°C で最大 1dpa まで Fe イオンを照射した結果、照射欠陥として転位ループの形成が確認されたが、溶質クラスタは確認されなかった。同条件で照射した FeCu 合金 (0.5%Cu) では転位ループと Cu クラスタが形成しており、炭素鋼でも Cu 濃度が高い場合には Cu リッチクラスタが形成される可能性が示唆された。

キーワード: 炭素鋼、照射脆化、イオン照射、アトムプローブ分析、地層処分、オーバーパック

1. 緒言

照射脆化は原子炉圧力容器について良く調べられているが、埋設後のオーバーパックは原子炉圧力容器に比べて低温、低照射速度で長期間に渡り照射されるため、原子炉圧力容器鋼について確立されている脆化予測式を拡張した予測は難しい。オーバーパックで想定される照射条件 (最大 4.32×10^6 dpa と見積もられている[1]) での炭素鋼の脆化量を予測するためには、脆化因子となるマイクロ組織の変化量を実験と解析により推定する必要がある。本研究では、解析モデル構築に資する知見を得るため、候補材料の一つである炭素鋼等を低温でイオン照射し、マイクロ組織変化を調べた。

2. 試験

炭素鋼 (0.01%Cu) と FeCu 合金 (0.5%Cu) に東京大学重照射研究設備のタンデトロン加速器を用いて 2.8MeV Fe²⁺ イオンを照射した。照射損傷量は 300nm 深さで 0.1dpa と 1dpa の 2 条件とした。照射温度は 90°C とし、炭素鋼については軽水炉条件で取得されたデータとの比較のため 290°C での照射も行った。照射に伴う硬化量を押し込み深さ 150nm に制御した超微小硬さ試験機 (Elionix ENT-2100) で測定し、マイクロ組織変化を透過型電子顕微鏡 (TEM, Hitachi HF3000) と日本原子力研究開発機構原子炉廃止措置研究センターに設置された 3 次元アトムプローブ (APT, CAMECA LEAP3000XHR) で調べた。なお、APT 分析は電圧モード、試料温度 50K、パルス比 0.15 で行った。

3. 結果

硬さの測定結果を図に示す。90°C 照射した炭素鋼では照射量 0.1dpa で硬化が飽和する傾向にあったが、FeCu 合金では 1dpa まで硬化が継続した。TEM 観察の結果、炭素鋼と FeCu 合金で直径数 nm の転位ループが数密度 $4 \sim 5 \times 10^{22}/\text{m}^3$ で確認された。転位ループの多くは $b=a(100)$ のバーガースベクトルを有し、照射量が増すとサイズが増加した。APT 分析の結果、炭素鋼では溶質クラスタの形成は確認されず、Mn 濃度に揺らぎが認められるのみであった。FeCu 合金では 0.1dpa から直径 1~2nm の Cu クラスタが形成し、照射量が増すと数密度は $1 \times 10^{24}/\text{m}^3$ から $4 \times 10^{24}/\text{m}^3$ に増加した。炭素鋼の脆化因子として転位ループが確認され、Cu 濃度が高い場合には Cu リッチクラスタが形成される可能性が示唆された。なお、290°C 照射した炭素鋼では転位ループと Mn-Si-P クラスタの形成が確認された。

本報告は、経済産業省資源エネルギー庁からの委託による「平成 27 年度地層処分技術調査等事業 (処分システム工学確証技術開発)」の成果の一部である。

参考文献

[1] 銅-炭素鋼複合オーバーパックの試作, JNC TN8400 99-049, (1999).

*Terumitsu Miura¹, Katsuhiko Fujii¹, Koji Fukuya¹, Masahiro Kawakubo²

¹Institute of Nuclear Safety System, ²Radioactive Waste Management Funding and Research Center

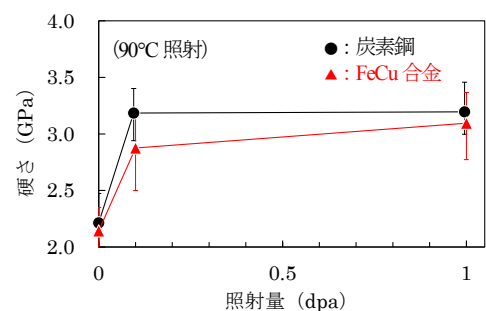


図 照射に伴う硬さの変化