

炭素鋼の低温照射下での脆化挙動に及ぼす Cu 濃度と照射速度の影響

Effects of copper concentration and dose rate on 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

炭素鋼とモデル合金に 90°C で Fe イオン照射と低照射速度の電子線照射を実施した。Cu 濃度が高い場合や、低照射速度の電子線照射の方が溶質クラスタの形成が促進されて硬化量も大きくなることが分かった。

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

1. 緒言

高レベル放射性廃棄物の地層処分に用いられるオーバーパックは、90°C 以下の温度と 9×10^{-16} dpa $\cdot$ s⁻¹ 以下の極めて低い損傷速度で長期間に渡り照射される。オーバーパックで想定される照射条件（最大 4.32×10^{-6} dpa [1]）で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、候補材料の一つである炭素鋼についてマイクロ組織変化の解析モデル構築に資する知見を得るため、Cu 濃度の異なる炭素鋼とそのモデル合金を 90°C で Fe イオンと電子線で照射し、脆化因子に及ぼす材料組成と照射速度の影響を調べた。

2. 試験

Cu 濃度の異なる炭素鋼（JIS G3106 SM400B、以下、低 Cu 炭素鋼：0.01%Cu、高 Cu 炭素鋼：0.5%Cu）と FeMnSi モデル合金（Fe-0.2Si-1.1Mn-0.5Cu）に、東京大学重照射研究設備のタンデントロン加速器を用いて 90°C で 2.8MeV Fe²⁺ イオンを照射した。損傷速度は 300nm 深さで 1×10^{-4} dpa $\cdot$ s⁻¹ であり、照射量は 0.01~1 dpa とした。また、高 Cu 炭素鋼に原子燃料工業（株）熊取事業所の電子加速器を用いて 90°C で 5MeV 電子線を照射した。損傷速度は 2×10^{-8} dpa $\cdot$ s⁻¹ で、照射量は 0.01 dpa とした。照射に伴う硬さの変化を超微小硬さ試験機（Elionix ENT-2100）で測定した。また、マイクロ組織変化を透過型電子顕微鏡（TEM, Hitachi HF3000）と 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。硬さの増加量は 0.1 dpa では同じだが、1 dpa では高 Cu 炭素鋼やモデル合金の方が大きい。0.01 dpa では電子線照射の方がイオン照射より硬さが増加した。TEM 観察では直径数 nm の転位ループが、数密度 10^{22} m⁻³ のオーダーで認められた。照射量が増すと数密度は増加したが、Cu 濃度や照射速度による違いは認められなかった。APT 分析では低 Cu 炭素鋼で Mn-Si クラスタが、高 Cu 炭素鋼とモデル合金で Mn-Si-Cu クラスタが抽出され、直径は約 2nm であった。Cu 濃度が高いとクラスタの数密度が増加した。また、0.1 dpa 以下ではクラスタはほぼ抽出されなかったが、電子線照射では 1 dpa のイオン照射と同程度のクラスタが抽出され、照射速度の低下はクラスタの形成を促進することが分かった。Cu 濃度と照射速度による硬さの違いはクラスタの形成量の違いと対応した。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 28 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。

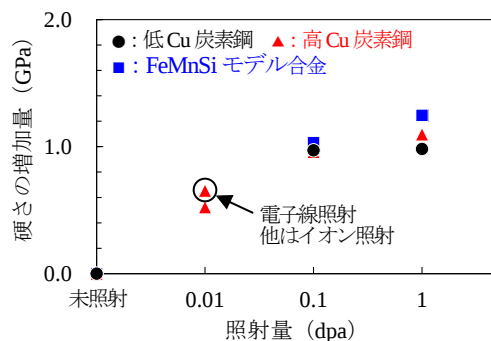


図 照射に伴う硬さの増加量

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