

イオン照射によるステンレス鋼中の溶質原子クラスターによる 照射硬化機構の検討

Study of irradiation hardening mechanism due to solute atom cluster in a SUS steel

*福元謙一¹ 馬淵貴魁彰¹ 藤井克彦²

¹福井大原子力研 ²INSS

イオン照射したオーステナイト系ステンレス鋼モデル合金に超微小硬度試験および TEM、APT 観察を行い、Ni-Si クラスターおよびフランクループに偏析する Ni-Si の照射硬化に対する影響の評価を行った。

キーワード：APT、TEM、照射硬化、整合析出強化モデル

1. 背景と目的

過去の研究において、イオン照射したステンレス鋼モデル合金中に形成された溶質原子クラスター（SC）である Ni-Si クラスターやマトリックス欠陥であるブラックドット（BD）やフランクループ（FL）等の微細組織と超微小硬度測定による照射硬化量について、等時焼鈍実験による損傷組織と硬さの相関について検討を行い、焼鈍回復による組織・強度変化から、各種欠陥の障害物強度因子を求めた。その結果 Ni-Si クラスターが弱い障害物因子を持つ事が明らかになった。本発表ではその障害物強度因子について検討し、整合析出物粒子の強化理論を用いて強化機構について検討する。

2. 実験方法

試料には、Fe-17Cr-12Ni-0.96Si 合金を用いた。表面研磨・溶体化処理後、京都大学エネルギー理工研 DuET 施設にて Fe³⁺イオンを加速電圧 6.2MeV、200℃の条件で最大 6.7dpa 照射した。照射後 250℃～550℃で 50℃ごとに 0.5h の照射後焼鈍を実施した。TEM・APT 観察から等時焼鈍実験による損傷組織と硬さの相関について検討を行い、焼鈍回復による組織・強度変化から、各種欠陥の障害物強度因子を求めた。

3. 結果

TEM 観察および APT 観察より得られた BD と FL、SC の直径と密度の結果から分散粒子強度モデルの式（オロワン式）を用いてそれぞれの硬化量を求め、最小二乗法より α_{sc} を算出した。降伏強度は超微小硬度試験の結果より換算を行った。この際すべての照射欠陥は短距離相互作用による障害物と仮定して二乗和平方根で計算した結果、 $\alpha_{sc}=0.029$ であった。一方、溶質原子クラスターがきわめて弱い障害物であることから BD や FL とは異なる硬化機構として独立に寄与する場合には累積和で計算され、 $\alpha_{sc}=0.014$ と求められた。いずれにおいても溶質原子クラスターの硬化寄与は BD や FL の 10 分の 1 程度であり弱い障害物であることが示された。またマクロな硬化寄与として NiSi クラスターの寄与は照射後～450℃焼鈍では硬化量全体の約 5 割を占めた。

弱い障害物強度因子であることから、整合析出強化モデルを用いた評価に適用できるか検討を行った。整合析出物強化機構モデルにおいて整合析出物によるせん断応力増加は次式で示される。

$$\Delta\tau \approx 3\mu|\varepsilon|^{3/2}\sqrt{Rf/b}$$

ここで μ は剛性率、 b はバーガーズベクトル、 ε は整合粒子と母相のミスフィットパラメーター、 R と f は整合析出物の直径と体積率を表す。溶質クラスターによる硬化寄与が整合析出物によるせん断応力増加であるとして計算すると、二乗和平方根の短距離相互作用障害物のケースで ε は 0.49%と求められた。このミスフィットパラメーターを 16%Ni 添加ステンレス鋼において fcc 構造と NiSi₃ 析出物の L₁₂ 型構造の混晶における Si 添加量による結晶格子定数の平均値からのずれと仮定した場合、35%の NiSi₃ が NiSi クラスター内を占有していると求められた。これは NiSi クラスター内に 8.8%の Si を含有していることになり、APT によるクラスター内の Si 濃度の実験値とほぼ同程度であることが分かった。このことから整合析出物強化モデルによる NiSi クラスターの硬化寄与を説明できることが分かった。

* Ken-ichi Fukumoto¹, Takaaki Mabuchi¹, Katsuhiko Fujii²

¹Research institute for nuclear engineering, Univ. of Fukui, ²Institute of Nuclear Safety System