



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	高エネルギー粒子線照射下でのオーステナイト系ステンレス鋼の損傷組織と強度の相関に関する研究〔論文内容及び審査の要旨〕
Author(s)	岡, 弘
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第11439号
Issue Date	2014-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/55485
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.1/jp/
Type	doctoral thesis
File Information	Oka_Hiroshi_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士（工学） 氏名 岡 弘

学 位 論 文 題 名

高エネルギー粒子線照射下でのオーステナイト系ステンレス鋼の損傷組織と強度の相関に関する
研究

(Microstructure-Strength Correlation in Austenitic Stainless Steels under High Energy Particle
Irradiation)

第一章は本研究の背景を述べる。核融合炉などの先進的エネルギーシステムに使われる材料の照射による材料特性変化は、重度の照射を受けるゆえ、従来のデータベースの範囲を大きく越える。したがって高照射量での材料挙動の評価が必須である。しかし、実際の照射実験で高照射量を達成するには膨大な時間と労力が必要であり現実的ではない。この状況に対処するため、シミュレーション照射実験と異種照射場における照射相関、数値計算モデリングを組み合わせ、材料挙動を予測する方法がとられてきた。照射下材料内で起こる現象は、時間的にも空間的にもエネルギー的にもマルチスケールの現象であり、複数の理論解析手法や実験手法を相補的に活用して問題の本質を理解し、照射下材料挙動を高精度で予測しようとして試みられてきた。

しかし従来の研究では、個々の現象とそれに対応する手法に関しては発展したが、それぞれを接続する研究（ある手法とある手法を数式でつなぐ、等）は未発展であった。つまり現状では、広範な時間・空間スケールをもつ照射下挙動に対し、個々の手法がもつスケールごとの理解しかなされていない。そこで本研究では、材料挙動予測を可能にするため、個々の現象の相関を明らかにすることを主題としたい。特に、微細組織と機械強度の相関、および空間スケールの異なる複数の実験手法の相関を得る。

第二章では高速炉燃料被覆管材料で最も中性子照射データの豊富な改良 SUS316 鋼を対象に、照射挙動のモデル化のための組織と機械強度の相関を評価した。改良 SUS316 鋼は温度範囲 773-1013K、照射量 $20.1 \times 10^{26} \text{n/m}^2$ 程度まで高速炉常陽にて照射されたのち、引張試験、硬さ、金相組織観察、TEM 組織観察が行われた。中性子照射によって当該材の降伏応力 ($T_{\text{test}} = T_{\text{irr.}}$) は減少し、その減少量は微細組織変化（主に転位密度の減少）からベイリー・ハーシュの関係式 $\sigma_y = \sigma_0 + M\alpha_d \mu b \rho^{1/2}$ およびオロワンの式 $\Delta\sigma_y = M\alpha_d \mu b (Nd)^{1/2}$ によって見積もられる量より大きかった（実測値とモデルとの乖離の指摘）。一方、照射による硬さ変化 ($T_{\text{test}} = \text{RT}$) と微細組織から見積もった強度変化の関係は、特に中温・高照射量においてよく一致した。以上より、降伏応力変化におけるモデルとの乖離の原因となった、試験温度に影響を受けやすい因子の存在の可能性を指摘した。また、照射による粒内や粒界での多量の炭化物の析出により、マトリクス中の固溶炭素量は著しく減少していることが TEM 像を用いた見積もりにより明らかとなり、固溶炭素量の減少が因子へ影響を及ぼすことの可能性についても指摘した。

第三章では障害物の一種である林転位の強度因子 α_d について、溶体化処理したモデル合金を用いて試験温度および固溶炭素量の影響を明らかにした。これは第二章において降伏応力変化を担保する主な要因が転位密度の減少であること、および試験温度と固溶炭素量の影響を受けやすい因子の存在が指摘されたためである。一軸歪の導入により林転位の密度を変えたモデル合金について、降

伏応力および転位密度をそれぞれ測定したところ、固溶炭素量の多い合金では強度因子 α_d の温度依存性は観られなかったが、固溶炭素量の少ない合金では α_d が温度の上昇とともに減少することが初めて明らかとなった。このメカニズムとして、林転位として存在する拡張転位が炭素雰囲気に着され、炭素濃度が高い場合には収縮により多くのエネルギーが必要なためであると説明した。

第四章では障害物として転位ループを想定し、523K でイオン照射した 316 鋼について検討した。イオン照射は実験の温度制御性・損傷量選択性に優れ中性子照射環境を模擬する方法として有用であるが、試料体積がとて小さく、強度評価にはナノインデンテーション法とマクロ強度評価法との相関説明が必須である。本章ではセクショニング法およびマルチレイヤー硬さモデルを導入し相関説明を試みた。まず、押し込み痕直下の断面 TEM 観察により、押し込みによる変形体積は半球形として近似できることを確認した。セクショニング法で損傷領域を四分割し、マルチレイヤー硬さモデルにより解析したところ、各層のローカル硬さを取得することに成功した。ローカル硬さに基づいた照射硬化量をそれぞれ対応する損傷量で整理したところ、マイクロビッカース硬度測定された中性子照射データと一致し、本方法の有用性が示された。硬化量と微細組織をオロワンの式で整理し、転位ループの強度因子 $\alpha_l = 0.2$ を得た。

第五章では障害物として酸化物を想定し、酸化物分散強化型 316 鋼 (ODS316) について組織-強度相関を検討した。ODS316 は改良 SUS316 鋼の微粉末とイットリア、チタン、ハフニウム粉末をボールミルし、熱間押出により固化形成された。酸化物は平均径 10nm ほどで大半が陰イオン欠損型螢石構造の $Y_2Hf_2O_7$ であり、母相と cube-on-cube の関係であったが、その分散状態は不均一であった。結晶粒径はばらつきを含むものの平均 1 μ m ほどで、通常の溶体化処理 316 鋼に比べ非常に小さかった。ODS316 の降伏強度は溶体化処理 316 鋼のそれと比べて向上し、室温では増加分のうち 80% は結晶粒微細化によることが明らかとなった。従って ODS316 では酸化物粒子が強度向上に果たす役割は小さく、強度因子 α_{oxide} は 0.08–0.1 程度と見積もられ、従来提唱されてきた値よりも小さかった。これは、酸化物の分散が不均一であるために有効粒子間距離が大きく、みかけの α_{oxide} が小さくなったものであり、均一分散の重要性を指摘した。

第六章では、第二章から第五章までを包括し、高エネルギー粒子線照射下での FCC 金属の組織-機械的特性に関する統合モデルについて示した。組織-強度相関についてはオロワンの式が有用であることを示し、式中の強度因子 α については、障害物の種類ごとに詳細に理解することの重要性を指摘した。特に林転位の強度因子については温度と固溶炭素濃度に影響されることを明らかにした。機械特性のスケール相関では、基本的に線形関係として問題はないことを示したが、一部特殊な場合(結晶粒が小さい場合、イオン照射材に代表されるような硬さの深さ依存が存在する場合、など)は適用できないことを示した。