

学 位 論 文 題 名

オーステナイト系ステンレス鋼の
照射損傷抑制に関する基礎的研究

学位論文内容の要旨

軽水炉の高経済化、高速増殖炉および核融合炉の実用化の実現には、中性子照射環境下で使用する炉構造材料の照射損傷を解決することが必須の課題である。特に、現在実用されているオーステナイト系ステンレス鋼は炉材料に要求されている諸特性に優れ、かつ原子炉プラントとしての使用実績が豊富であることから、苛酷な中性子照射環境場である高速増殖炉や核融合炉用の候補材料として、その適用が期待され、照射環境に十分耐え得る材料開発が要求されている。

本論文は、オーステナイト系ステンレス鋼を対象に照射環境下でも機能の劣化しないステンレス鋼の改善、開発を目的とし、とくに材料特性に著しく影響する照射過程で生ずる原子空孔集合体であるボイド形成および照射によって誘起される合金組成の変化、さらに核変換で導入される水素挙動など照射誘起現象の解明とその改善等について、照射損傷素過程と合金元素との相互作用に注目し、超高压電子顕微鏡およびイオン加速器を用いてシミュレーション照射研究を行った。

本論文は全 8 章から構成されている。

第 1 章では本研究の背景として、軽水炉、高速増殖炉および核融合炉の構成材料であるオーステナイト系ステンレス鋼に関する照射損傷研究の現状分析と問題点を指摘し、未解決な重要課題を抽出し、従来までの研究の詳細と本研究の位置づけ及び本論文の構成と内容を明示した。

第 2 章では、本研究における電子線照射及び水素イオン照射によるステンレス鋼に対するはじき出し損傷の評価方法を論述した。

第 3 章では、材料の照射損傷に及ぼす材料組織因子の影響を明らかにする目的で、電子線照射によりオーステナイト系ステンレス鋼の析出物分散効果の影響について、ボイド形成および転位組織発達など照射損傷の素過程を中心に検討した。その結果、照射損傷の発達の抑制に時効析出物の存在および添加元素の固溶が非常に効果的であることを見出し、その効果は鋼中の時効析出物 γ' と母相との界面における照射で導入された点欠陥の消滅によることを示した。さらに鉄-チタン希薄二元合金では、鉄中に固溶している添加元素である Ti が原子空孔と格子間原子の再結合による点欠陥の消滅が促進され、熱平衡以上の過剰原子空孔濃度の減少によりボイド核

形成・成長が抑制されることを明らかにした。

第4章では、第3章で検討した照射損傷組織変化に及ぼす材料組織因子、とくに添加元素の固溶効果について、炭素濃度の低いオーステナイト系ステンレス鋼を基本材料として、ボイド形成とそれに伴うスエリング挙動を調べた。固溶した添加元素と照射点欠陥との相互作用の定量的評価に基づきボイドスエリングの抑制過程を解明する目的から、まず合金元素の添加に伴う結晶格子の寸法変化をX線回析から決定し、溶媒原子に比較し溶質原子寸法の大きい、いわゆるオーバーサイズ元素（寸法因子： $V < Ti < Nb < Ta < Zr < Hf$ ）を添加した場合、照射によるボイドの核形成までの照射時間が長くなると同時にボイド成長が抑制される結果、ボイドスエリングが減少することを明らかにした。とくに、寸法因子の非常に大きい Hf または Zr を微量添加したステンレス鋼でスエリングが殆ど生じないことから、これら元素の添加はスエリング抑制に顕著な効果を有することを始めて明らかにした。その効果は、ステンレス鋼中に固溶しているオーバーサイズ元素による点欠陥の捕獲とそれに伴う点欠陥の移動度の低下および点欠陥の再結合の促進による点欠陥濃度低下に起因することを明らかにした。

第5章では、照射下での誘起される組成変化である偏析現象について、電子線照射により調べ、添加元素の固溶効果により照射過程で誘起される結晶粒界における溶質原子の偏析が抑制されることを始めて明らかにした。即ち、結晶粒界において、ステンレス鋼の構成元素である Cr 濃度は枯渇し、Ni は濃化する、いわゆる溶質原子の照射誘起偏析は、オーバーサイズ元素である V, Ti, Nb, Ta, Zr または Hf の第3元素を微量添加（0.35at%）することにより顕著に抑制され、とくに寸法効果の顕著な Hf または Zr の添加が偏析抑制に最も効果的であることを解明した。また、この偏析抑制効果はボイド核形成・成長過程と同様、添加元素による点欠陥捕獲効果による点欠陥移動度の減少と点欠陥再結合による点欠陥濃度の減少に伴う、溶質原子の拡散に関与する点欠陥の結晶粒界への流入量の低減に起因することを明らかにした。

第6章は、核融合炉候補材料として注目されている、オーステナイト系ステンレス鋼の Ni を Mn で置換し、さらに高温特性改善のために Al を添加した低放射化 Fe-Cr-Mn-Al 鋼について、溶質原子の照射誘起粒界偏析挙動を検討した。本合金鋼でも同様にサイズ効果に従い、オーバーサイズ溶質原子が結晶粒界で濃度を減少、とくに寸法効果の大きい Al で顕著となることを示し、オーバーサイズ元素でも寸法差の小さい添加元素ほど照射で誘起される溶質原子の濃度の枯渇程度が低下することを明らかにし、オーバーサイズ溶質原子の照射誘起偏析は、溶媒原子に対する溶質原子の相対的な原子サイズを考慮した第3合金元素の添加により制御できることを解明した。

第7章では、中性子照射下で核変換で導入される水素の効果と照射損傷の相乗効果として、ボ

イド形成に注入水素が強く影響し、とくにステンレス鋼の結晶粒界における水素気泡形成に強く関与していることを電子線照射と水素イオン注入の組み合わせ照射実験により見出した。また、粒界水素気泡の形成は Ti などの第 3 元素の微量添加により抑制が可能となることを明らかにしている。これは添加元素が原子空孔を捕獲し、さらに注入水素が存在する場合、水素が添加元素により捕獲された原子空孔と相互作用し、水素気泡の核形成の場所となることを実験的に明らかにした。

第 8 章では、本研究の成果について総合的に考察し結論した。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 高 橋 平七郎

副 査 教 授 石 井 邦 宜

副 査 教 授 成 田 敏 夫

本研究は、中性子照射環境下で使用される軽水炉、高速増殖炉および融合炉用構造材として、安全性、経済性および耐照射損傷特性に優れた材料開発を目的とし、その特性向上が期待されている 316 系ステンレス鋼を基とした第 3 元素添加材料について、超高圧電子顕微鏡法による電子線照射及びイオン加速器による水素イオン注入の併用により、照射損傷挙動の解明と耐照射損傷特性向上に対する合金化効果を明らかにしたものである。

まず、時効および照射誘起析出物並びに IVa および Va 族の第 3 添加元素の固溶によりボイド核形成・成長の抑制が可能で、その効果は寸法因子の大きい元素ほど顕著であり、とくに Hf および Zr が有効であることを明らかにした。

次に、ステンレス鋼の主成分である Ni および Cr の照射誘起偏析に及ぼす第 3 元素の添加効果を照射後の結晶粒界近傍における微小領域組成分析に基づき調べ、ボイド形成と同様に原子寸法の大きい元素の添加により照射誘起偏析が抑制されることを見い出した。その要因として、照射で導入された点欠陥の添加元素による捕獲に起因した点欠陥移動度の減少と、原子空孔および格子間原子の再結合による点欠陥消滅の促進に伴う、偏析要因である粒界へ拡散する点欠陥有効濃度減少が支配的であることを究明した。

最後に、同様の寸法効果は新しく開発した Fe-Cr-Mn 系ステンレス鋼における照射挙動および注入水素と照射欠陥との相互作用により形成される水素気泡の抑制にも有効であることを確認

し、ステンレス鋼の耐照射損傷特性向上に点欠陥と強く相互作用する原子寸法の大きい第3元素を添加した材料開発を提案した。

以上のように、本研究は、優れた耐照射損傷特性を有する316系オーステナイト系ステンレス鋼の開発に対する添加元素効果を解明したものであり、金属材料工学に寄与するところ大なるものがある。

よって、著者は、博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。