博士（工　学）　笠　原　茂　樹

学位論文題名

オーバーサイズ元素添加によるステンレス鋼の照射誘起偏析抑制に関する研究

学位論文内容の要旨

オーステナイト系ステンレス鋼(以下ステンレス鋼)は、軽水炉の炉内機器や構造物の材料として用いられており、近年では超臨界圧水冷却炉等の高効率将来炉の燃料被覆管の候補材として有望視されている。原子炉の炉心環境では、中性子照射量の増加に伴って構造材料の粒界型応力腐食割れの感受性が増大することが知られている。この事象は照射加速応力腐食割れ(Irradiation Assisted Stress Corrosion Cracking: 以下 IASCC)と呼ばれ、原子炉の健全性や信頼性の維持や向上の点で、そのメカニズムの解明と対策技術の確立が急がれている。本研究では、IASCC メカニズムの解明と対策材料の開発の一環として、ステンレス鋼の粒界における照射誘起偏析(Radiation Induced Segregation: 以下 RIS)に着目し、添加元素と熱処理の影響について詳細に検討する。

第 1 章「緒言」では、既往の研究成果に基づき、ステンレス鋼の粒界で生じる RIS について、特に原子空孔の粒界への拡散に伴う Cr 欠乏のメカニズムから整理し、IASCC との関係を示すと共に、それを抑制するための合金設計の考え方をまとめた。また RIS の検証のための 1 MeV 電子線照射と粒界分析の妥当性を述べた。さらに、本研究の目的を明確に述べた。

第 2 章「粒界 Cr 欠乏に及ぼす Ti 及び Nb 添加効果」では、ステンレス鋼にオーバサイズ元素の Ti と Nb を約 0.2～0.3 wt%添加した試料を製作し、天下元素が原子空孔をトラップして粒界の Cr 欠乏を抑制する効果を検証した。その結果、Ti 添加 304L 鋼において RIS の抑制が最も顕著になった。一方 Nb 添加材においても Cr 欠乏抑制の効果は見られたが、350℃を境にその有効性が異なる知見を得た。加えて本章では、電子線照射と約 290℃の中性子照射の結果を比較することにより、中性子照射の模擬手法としての電子線照射の意味を検討した。

第 3 章「粒界における Cr 及び Mo 共偏析」では、Cr と同様に粒界近傍で欠乏する Mo の挙動に着目し、Cr と Mo の共偏析の影響について検討した。その結果、低温照射では、Cr に比べて Mo が先に欠乏し始めることと、Mo 添加したステンレス鋼では溶体化熱処理後であっても粒界に Mo が濃化し、その共偏析効果によって粒界 Cr 欠乏が抑制されることを見出した。

第 4 章「粒界 Cr 欠乏に及ぼす Zr 及びその炭化物析出熱処理の効果」では、オーバサイズ元素である Zr に着目し、316L ステンレス鋼に Zr と C を添加した供試材を用いて、固溶化 Zr と Zr 炭化物(ZrC)の粒界 Cr 欠乏抑制効果について検討した。固溶化 Zr の添加量を 0～0.6 wt%の範囲で変化させたところ、350℃以上の温度では、粒界 Cr 欠乏抑制に顕著な効果が見られた。また ZrC 析出熱処理を施すことによっても同様の効果があることを確認した。一方 350℃以下では、Zr 添加と ZrC 析出による効果は、高温に比べて顕著ではなかった。加えて、元素添加と熱処理が粒界の Cr 欠乏の抑制に及ぼす効果を、原子空孔のトラップと温度の観点から考察した。

第 5 章「Cr サイズ因子調整した Mn 添加ステンレス鋼の粒界 Cr 欠乏挙動」では、溶質元素のサイズ因子と原子空孔との相互作用に着目し、Mn を 10 wt%添加して母相の格子定数を大きくし、相対的に Cr サイズ因子を 1 に近づけて相互作用を小さくすることにより Cr 欠乏の抑制が可能かどうかを検討した。その結果、350℃以上では Cr 欠乏の抑制を確認出来たが、300℃以下ではその効果は無かった。この結果から、原子空孔と Cr 原子の相互作用にによる Cr 欠乏は温度に依存することを示唆した。

第 6 章「鋭敏化熱処理で粒界 Cr 欠乏した 304 ステンレス鋼に及ぼす照射の重畳効果」では、溶接した SUS304 ステンレス鋼の熱影響部での粒界の Cr 欠乏に対して、RIS が重畳した場合について検討した。SUS304 は熱処理条件によって鋭敏化度、すなわち粒界 Cr 欠乏の程度が変わるが、強鋭敏化熱処理した粒界では Cr 濃度が低くなっているものの照射により Cr 欠乏はそれ以上は進行しなかった。一方、弱鋭敏化熱処理した場合は、照射により Cr 欠乏は促進された。この鋭敏化度による Cr 欠乏の挙動は、粒界近傍の固溶炭素量と関連することを示した。

第 7 章「総括」では、照射したオーステナイト系ステンレス鋼の RIS、特に Cr 欠乏に対する添加元素と熱処理の効果を目的とする本研究の知見を纏め、総合的に考察した。特に、350℃を境にした挙動の変化は重要である。さらに、軽水炉や超臨界圧水冷却炉等の照射環境に応じて、粒界の RIS を抑制することにより耐 IASCC 性の改良合金を設計するための基本的考え方を提案した。

学位論文審査の要旨

主 査　教 授　大 貫 惣 明
副 査　教 授　工 藤 昌 行
副 査　教 授　渡 辺 精 一
副 査　助教授　柴 山 環 樹

学 位 論 文 題 名

オーバーサイズ元素添加によるステンレス鋼の照射誘起偏析抑制に関する研究

本論文は、軽水炉や超臨界圧水冷却炉の炉内機器や構造物の材料に生じる照射加速応力腐食割れ(IASCC)メカニズムの解明と対策材料の開発の一環として、ステンレス鋼の照射誘起偏析(RIS)に着目し、電子線照射による系統的な実験からオーバサイズの添加元素(Ti, Nb, Mo, Zr, Mn)と熱処理の影響について検討したものである。その主要な成果は次の点に纏められる。

① 電子線照射を中性子照射の結果を比較することにより、290℃の軽水炉中の照射で生じる照射誘起偏析を実験的に模擬できることを示した。

② TiとNbの添加に着目し、これらが原子空孔をトラップして粒界のCr欠乏を抑制することを検証した。その結果、Ti添加はRISを有効に抑制するのに対して、Nb添加は350℃以下でのみ有効なことを示した。

③ Moの添加に着目し、CrとMoの共偏析について検討した。Mo添加したステンレス鋼では溶体化処理によりMoは粒界に濃化し、照射環境ではCrとの共偏析効果によって粒界Cr欠乏を抑制することを見出した。

④ Zrの添加に着目して粒界Cr欠乏を検討した。350℃以上では、Zrが粒界Cr欠乏の抑制に有効であり、またZrC析出処理も同様の効果があるが、350℃以下では顕著ではなかった。この効果を原子空孔のトラップと温度の観点から説明した。

⑤ Moの添加に着目して粒界Cr欠乏を検討した。Mnを高濃度に添加して母相の格子定数を大きくすると、Crの相対的サイズ因子は1に近づき、相互作用は小さくなると予想した。その結果、350℃以上ではCr欠乏の抑制が可能であることを示した。

⑥ 溶接熱影響部で粒界Cr欠乏とRISが重畳した場合を検討した。熱処理により敏化した粒界ではCr濃度が低下するが、照射によりCr欠乏はそれ以上は進行しなかった。この鋭敏化による抑制効果は、固溶炭素の挙動と関連することを示した。

これを要するに、著者は、オーステナイト系ステンレス鋼の照射誘起偏析に対する添加元素と熱処理の効果を電子線照射から明らかにすることに成功した。またこの結果に基づき、オーバーサイズ元素の添加により耐 IASCC 性の改良合金を設計するための基本的考え方を提案した。これは、照射損傷を伴う他の未来型エネルギーシステムの材料開発について有効であり、材料工学の発展に貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格があるものと認める。