

照射劣化したオーステナイトステンレス鋼の 溶接補修と亀裂進展評価に関する研究

学位論文内容の要旨

本研究は、沸騰水型原子炉の炉内構造物に対する健全性評価法の高度化に資するため、炉内構造物の主要材料であるオーステナイトステンレス鋼を研究対象とし、溶接部における中性子照射の影響として照射欠陥の熱回復やヘリウムバブルの形成を微細組織の観点から評価するとともに、き裂進展評価の基礎的知見取得のため照射応力緩和挙動について明らかにすることを目的としている。炉内構造物の高経年化対策の一環として照射誘起応力腐食割れ (IASCC: Irradiation Assisted Stress Corrosion Cracking) の評価は重要な項目の一つである。この高度化のためにはそのメカニズムの解明が重要であり、微細組織の観点からの研究が有効な手段となる。また、中性子照射材の溶接補修の観点からは、ヘリウムバブル形成による割れの発生や機械的特性の変化が生じることから、溶接熱の影響を把握する必要があり、照射欠陥の熱回復やヘリウムバブル形成の過程についての知見も重要である。

以上のことから、本研究ではオーステナイトステンレス鋼溶接部における中性子照射の影響を評価するため、微細組織の変化に着目した。また、IASCC 進展評価をより実際の挙動に即して高度化するためには、応力の緩和挙動を考慮する必要がある。しかしながら、照射応力緩和現象に関する知見は少ないのが現状である。このため、本研究ではオーステナイトステンレス鋼の中性子照射による応力緩和現象に着目した。

本論文は 6 章で構成され、各章の概要は以下の通りである。

第 1 章は、緒言である。世界における原子力発電の現状と、その重要性を述べた。また、原子力発電設備の安全性や信頼性を高め稼働率を高くすることが求められており、高経年化に伴い生じる IASCC 等の材料の変化を適切に評価すること、およびメカニズムを解明して抜本的な対策法を開発することが重要であることを述べた。また、炉内構造物の高経年化対策については、産業界、学会、国・官が共同で検討を進めており、日本機械学会の規格を国が維持基準として採用していることを述べた。

第 2 章では、オーステナイトステンレス鋼の炉内構造物で問題となる IASCC について、主要因の結晶粒界偏析を、照射条件の制御が容易である電子線によるシミュレーション照射により調査した。特に、熱鋭敏化によって粒界の Cr が欠乏したステンレス鋼が電子線照射を受けた場合、粒界の Cr や Ni や不純物元素の濃度分布の変化について調べた。その結果、573K においても電子線照射により粒界偏析が生じることを確認した。また、熱鋭敏化による Cr 欠乏は電子線照射により進行し、欠乏幅が狭くて欠乏量の多い濃度分布となることが明らかになった。

第 3 章では、加熱による照射劣化の回復、特に粒界偏析の回復挙動と耐食性との関係を検討し

た。中性子照射した試料に熱処理を施した後、低ひずみ速度引張試験による粒界破面率の測定、透過電子顕微鏡法による粒界分析及び組織観察、計算による粒界 Cr 欠乏回復の検証を行った。その結果、723 K 以上の熱処理で粒界破面率は 0 パーセントまで回復し、粒界 Cr 濃度は 12mass パーセントまで回復することを示した。また、熱処理による偏析の回復は粒界の数原子層で生じ、IASCC はこの影響を受けることを示した。

第 4 章では、沸騰水型原子炉で中性子) 照射された SUS304 鋼に 623K~1173K で 1 時間熱処理を施し、照射欠陥の回復やヘリウムバブルの形成に及ぼす温度の影響や場所を詳細に調べた。その結果、ヘリウムバブルは照射欠陥の回復が顕著になる温度以上で形成されることを明らかにした。また、ヘリウムバブルは熱処理温度が高くなるほど大きくなり、そのサイズ分布は対数正規分布に従うことを明らかにし、その成長は合体によることを示した。また、その形成位置は転位線や粒界であることを明らかにし、転位線の両端や屈曲部、粒界転位上、等に優先的に形成されることを明らかにした。

第 5 章では、ステンレス鋼の照射応力緩和現象の基礎的な知見を得るため、単純な応力場である C リング試験片および曲げ試験片による試験と、炉内構造物に近い条件として 3 軸応力場である溶接試験片による応力緩和試験を実施した。応力緩和挙動は、遷移クリープに係わるものと定常クリープに係わるものに分けられるが、遷移クリープに係わる応力緩和は曲げ試験にのみ見られ、初期転位密度が高い場合に発生しやすいことを示した。また、定常クリープに係わる応力緩和挙動は、初期負荷応力によらず同じで試験方法に依存しないことを明らかにした。照射応力緩和挙動を予測するため、遷移クリープと定常クリープ両方に係わる挙動を考慮した式を適用し、3 軸応力場である溶接試験片の結果から係数を求め文献データと比較した。その結果、照射応力緩和には鋼種依存と照射環境依存は見られないことを示した。また、測定結果及び文献データから、定常クリープに係わる係数を求め、オーステナイト系ステンレス鋼の係数は、試験方法に係わりなく $1.3(\times 10^{-6}/\text{MPa}/\text{dpa})$ 程度であることを示した。

第 6 章は、総括である。ステンレス鋼に及ぼす中性子照射の影響として、粒界偏析や照射欠陥の形成、加熱による照射欠陥の回復およびヘリウムバブルの形成について明らかにした。また、照射応力緩和について単純な応力場および 3 軸応力場における現象から応力緩和式における係数を示した。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 大 貫 惣 明
副 査 教 授 鵜 飼 重 治
副 査 教 授 大 塚 俊 明
副 査 准教授 橋 本 直 幸

学 位 論 文 題 名

照射劣化したオーステナイトステンレス鋼の 溶接補修と亀裂進展評価に関する研究

本研究は、沸騰水型原子炉の炉内構造物の健全性評価法を高度化するために、主要材料であるオーステナイトステンレス鋼を研究対象として、溶接部での中性子照射の影響を評価するとともに、照射後溶接時のき裂進展評価のために、照射応力緩和挙動について明らかにしたものである。

本論文は6章で構成されている。

第1章は、緒言であり、近年のエネルギー事情から、高経年化に伴うIASCC等の材料の変化の適切な評価法や、照射後補修溶接の重要性を述べ、本研究の目的を示している。

第2章では、オーステナイトステンレス鋼の炉内構造物で問題となるIASCCについて、主要因の結晶粒界偏析を電子線によるシミュレーションにより調査した結果を述べている。特に、熱鋭敏化による粒界のCr欠乏したステンレス鋼が電子線照射を受けた場合、実用温度においても粒界偏析が生じることを確認した。また、電子線照射はCr欠乏を進行させることを明快に示した。

第3章では、加熱による照射劣化の回復を検討し、特に粒界偏析の回復挙動と耐食性との関係を明らかにしている。中性子照射した試料を熱処理し、低ひずみ速度引張試験で粒界破面率を測定し、電子顕微鏡法による粒界分析と組織観察し、粒界Cr欠乏回復を検証した。その結果、723 K以上で粒界Cr濃度は12massパーセントまで回復し、粒界破面率も完全に回復することを示した。また、熱処理による偏析の回復は粒界の数原子層で生じることを明らかにした。

第4章では、中性子照射されたステンレス鋼に熱処理を施し、照射欠陥の回復やヘリウムバブルの形成に及ぼす温度の影響やその場所を調べた。その結果、ヘリウムバブルの形成は照射欠陥の顕著に回復する温度以上で生じることを明らかにした。また、ヘリウムバブルは高温ほど合体により成長し、対数正規のサイズ分布に従うことを明らかにした。

第5章では、ステンレス鋼の照射応力緩和現象の基礎的な知見を得るために単純応力場のCリング試験と曲げ試験を実施するとともに、3軸応力場の応力緩和試験を実施した。遷移クリープに係わる応力緩和は曲げ試験にのみ見られ、初期転位密度が高い場合に発生しやすいことを示した。また、定常クリープに係わる応力緩和挙動は、初期負荷応力によらないことを明らかにした。照射応力緩和挙動を予測するため、遷移クリープと定常クリープ両方を考慮した式を適用し、照射応力

緩和には鋼種依存と照射環境依存がないという重要な結論を得た。

第6章は、総括を示す。

これを要するに、著者は、照射劣化したオーステナイトステンレス鋼の溶接補修と亀裂進展評価に関する研究を行い、中性子照射したステンレス鋼の粒界偏析と照射欠陥の形成と加熱回復とヘリウムバブル形成の関係について明らかにした。また、単純応力場と3軸応力場における新規の応力緩和式を提案した。これらの結果は、高経年化した軽水炉の材料の予測するために重要な知見であり、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。