

学位論文題名

高速炉用フェライト/マルテンサイト鋼の 機械的強度特性に及ぼす照射効果

学位論文内容の要旨

現在、軽水炉に代わる次世代原子力システムの実用化に向けて研究開発が展開されている。次世代原子力システムの中でも、資源の有効利用と最短のエネルギー確保の観点から、液体金属ナトリウム高速炉(以下、高速炉)の実用化が最も有望視されている。この高速炉の開発技術は日本が世界で最も進んでおり、商業炉としての実用化に向け、国策として着実に展開されている。特に、安全性確保と高稼働率を有する高速炉開発のための重要課題として、高温・高速中性子照射環境下に曝される被覆管等の炉心材料の健全性の確保が必要不可欠とされている。とりわけ、炉心材料は、高速中性子照射環境下で長期間使用する場合に著しい寸法変化(スエリング)を生じると、破損の要因となり炉内材料の健全性が損なわれることになる。

従来は、炉心材料として316鋼等のオーステナイト鋼について、照射研究が展開されてきたが、スエリング特性の観点から、高照射環境に十分耐え得るのが設計上困難であることが判明し、オーステナイト鋼に代わる材料として、耐スエリング特性に優れているフェライト系材料(フェライト/マルテンサイト鋼を含む)が注目されるようになった。しかしながら、これまでの照射研究のほとんどは、オーステナイト鋼が主であり、フェライト鋼に関する照射データ、特に、炉心材料の照射後強度特性に関する公表データは極めて少ないのが現状であり、日本独自の研究開発が余儀なくされている。

以上の背景のもとに本研究では、高速炉炉心材料として日本原子力研究開発機構で開発された11Crフェライト/マルテンサイト鋼(以下、PNC-FMS)について、高速中性子照射下における照射後機械的特性、照射に伴う微細組織変化、及びこれら組織変化と機械的特性との相関性を明らかにすることを目的とした。

本論文は、6章で構成されている。

第1章では、高速炉及び原子力材料開発に関する現状として、高速炉用炉心材料の開発経緯を述べるとともに、PNC-FMSを炉心材料として適用するうえでの課題と目的を記述した。

第2章では、高速炉稼働時の温度条件である673～973Kの温度範囲で照射されたPNC-FMS被覆管に関する照射後の機械的特性として、引張及び急速加熱バースト試験による材料特性を評価した。その結果、実稼働温度である673Kで高照射量(約100dpa)においても設計に十分耐え得る延性を有していることが確認された。また、更に高温である773～873Kの照射温度範囲でも、照射後の強度特性は未照射材とほとんど相違しないものの、この温度以上になると、強度が低下することを見出し、照射温度依存性の観点から、系統的な引張試験と急速加熱バースト試験により比較評価した結果、急速加熱バースト試験で得られた機械的強度特性の低下は主として照射軟化に起因す

ることが明らかにされた。

第3章では、PNC-FMS 被覆管の炉内クリープ破断試験により、炉内強度特性を初めて明らかにした。炉心材料、特に、被覆管は、高効率化、すなわち高燃焼度化条件での長期間運転サイクルを実現するために、高速炉運転期間中に破損しないことが最も重要である。この観点から、炉内での寿命評価のために炉内クリープ破断強度評価を行った。その結果、オーステナイト鋼で確認された照射前後での破断強度低下は確認されなかった。これは、PNC-FMS の特性として炉内で破断に至る第3次クリープの出現が遅れる、すなわち、材料変形を促進する応力集中が照射下で発生しがたく、結晶粒界などにおけるクラック核形成を抑制する機構が作用していることが示唆された。

第4章では、PNC-FMS をラップ管として使用する場合、照射後衝撃特性評価が必要であることから、この衝撃特性を内部組織との関連で調べた。ラップ管に対しては、炉内及び炉外での燃料取扱い時に燃料集合体の健全性の担保、及び地震時の衝撃荷重等対し脆性破壊が生じない特性が求められており、その特性評価として延性-脆性遷移温度 (以下、DBTT) 評価を行った。その結果、衝撃特性は照射により低下するが、フェライト鋼の鋼種に関わらず約 10dpa の照射量で衝撃特性低下が一定となることが示唆された。また、試験片サイズ効果を考慮し、全ての照射材に対する DBTT を定式化した評価を行い、炉内使用中に破壊に至らないことを明らかにした。また、組織観察の解析により、DBTT の高温側へのシフトは析出物の分布形態に殆ど影響されず、主としてラスマルテンサイト組織 (以下、ラス組織) の変化に起因することを初めて明らかにした。

第5章では、前章までの照射後の強度特性に及ぼす組織の影響を明らかにする目的から、照射温度 673~943K で約 100dpa まで照射した PNC-FMS 被覆管と照射温度と同じ温度での熱時効材における内部微細組織観察を行った。その結果、照射温度 678K の場合、局所的に若干ボイド形成が観察されたが、そのボイドスエリング量は高々 0.05

第6章では、本研究で得られた成果を総括するとともに、今後の展望等を示した。本研究では、高速炉炉心材料使用条件下での PNC-FMS の高速中性子照射後の強度特性及び照射中の炉内クリープ強度の評価と中性子照射後の内部微細組織観察から、本鋼のラス組織の回復挙動と析出形成分布を観察評価し、照射後強度特性は主要内部組織であるラス組織の回復、すなわち、内部組織の安定性に強く依存することがはじめて明らかにされ、微細組織の系統的観察解析に基づき照射による機械的特性変化が相関的に評価可能であり、PNC-FMS は優れた特性を有していることが実証された。

以上、本論文では、高速炉炉心材料として開発された PNC-FMS について高速炉運転条件を考慮し、照射後強度特性と微細組織解析を実施した。その結果、内部組織は高温高照射量まで安定であり、機械的強度特性も比較的高温まで保持されることを実証した。また、高速炉環境で使用される材料特性は内部組織と密接に関連して相関しており、機械的強度特性は組織解析から半定量的に評価できることを初めて明らかにした。これにより、本研究成果は、今後の実証炉の高速炉炉心材料設計へ適用に有効であることが示された。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 渡 辺 精 一

副 査 教 授 鬼 柳 善 明

副 査 教 授 鵜 飼 重 治

副 査 准教授 柴 山 環 樹

学 位 論 文 題 名

高速炉用フェライト/マルテンサイト鋼の 機械的強度特性に及ぼす照射効果

現在、軽水炉に代わる次世代原子力システムの実用化に向けて研究開発が展開されている。次世代原子力システムの中でも、資源の有効利用と最短のエネルギー確保の観点から、液体金属ナトリウム高速炉（以下、高速炉）の実用化が最も有望視されている。この高速炉の開発技術は日本が世界で最も進んでおり、商業炉としての実用化に向け、国策として着実に展開されている。特に、安全性確保と高稼働率を有する高速炉開発のための重要課題として、高温・高速中性子照射環境下に曝される被覆管等の炉心材料の健全性の確保が必要不可欠とされている。とりわけ、炉心材料は、高速中性子照射環境下で長期間使用する場合に著しい寸法変化（スエリング）を生じると、破損の要因となり炉内材料の健全性が損なわれることになる。

従来は、炉心材料として 316 鋼等のオーステナイト鋼について、照射研究が展開されてきたが、スエリング特性の観点から、高照射環境に十分耐え得るのが設計上困難であることが判明し、オーステナイト鋼に代わる材料として、耐スエリング特性に優れているフェライト系材料（フェライト/マルテンサイト鋼を含む）が注目されるようになった。しかしながら、これまでの照射研究のほとんどは、オーステナイト鋼が主であり、フェライト鋼に関する照射データ、特に、炉心材料の照射後強度特性に関する公表データは極めて少ないのが現状であり、日本独自の研究開発が余儀なくされている。

以上の背景のもとに本研究では、高速炉炉心材料として日本原子力研究開発機構で開発された 11Cr フェライト/マルテンサイト鋼（以下、PNC-FMS）について、高速中性子照射下における照射後機械的特性、照射に伴う微細組織変化、及びこれら組織変化と機械的特性との相関性を明らかにすることを目的とした。

本論文は、6 章で構成されている。

第 1 章では、高速炉及び原子力材料開発に関する現状として、高速炉用炉心材料の開発経緯を述べるとともに、PNC-FMS を炉心材料として適用するうえでの課題と目的を記述した。

第 2 章では、高速炉稼働時の温度条件である 673～973K の温度範囲で照射された PNC-FMS 被覆管に関する照射後の機械的特性として、引張及び急速加熱バースト試験による材料特性を評価し

た。その結果、実稼動温度である 673K で高照射量 (約 100dpa) においても設計に十分耐え得る延性を有していることが確認された。また、更に高温である 773~873K の照射温度範囲でも、照射後の強度特性は未照射材とほとんど相違しないものの、この温度以上になると、強度が低下することを見出し、照射温度依存性の観点から、系統的な引張試験と急速加熱バースト試験により比較評価した結果、急速加熱バースト試験で得られた機械的強度特性の低下は主として照射軟化に起因することが明らかにされた。

第 3 章では、PNC-FMS 被覆管の炉内クリープ破断試験により、炉内強度特性を初めて明らかにした。炉心材料、特に、被覆管は、高効率化、すなわち高燃焼度化条件での長期間運転サイクルを実現するために、高速炉運転期間中に破損しないことが最も重要である。この観点から、炉内での寿命評価のために炉内クリープ破断強度評価を行った。その結果、オーステナイト鋼で確認された照射前後での破断強度低下は確認されなかった。これは、PNC-FMS の特性として炉内で破断に至る第 3 次クリープの出現が遅れる、すなわち、材料変形を促進する応力集中が照射下で発生しがたく、結晶粒界などにおけるクラック核形成を抑制する機構が作用していることが示唆された。

第 4 章では、PNC-FMS をラップ管として使用する場合、照射後衝撃特性評価が必要であることから、この衝撃特性を内部組織との関連で調べた。ラップ管に対しては、炉内及び炉外での燃料取扱いに燃料集合体の健全性の担保、及び地震時の衝撃荷重等対し脆性破壊が生じない特性が求められており、その特性評価として延性-脆性遷移温度 (以下、DBTT) 評価を行った。その結果、衝撃特性は照射により低下するが、フェライト鋼の鋼種に関わらず約 10dpa の照射量で衝撃特性低下が一定となることが示唆された。また、試験片サイズ効果を考慮し、全ての照射材に対する DBTT を定式化した評価を行い、炉内使用中に破壊に至らないことを明らかにした。また、組織観察の解析により、DBTT の高温側へのシフトは析出物の分布形態に殆ど影響されず、主としてラスマルテンサイト組織 (以下、ラス組織) の変化に起因することを初めて明らかにした。

第 5 章では、前章までの照射後の強度特性に及ぼす組織の影響を明らかにする目的から、照射温度 673~943K で約 100dpa まで照射した PNC-FMS 被覆管と照射温度と同じ温度での熟時効材における内部微細組織観察を行った。

第 6 章では、本研究で得られた成果を総括するとともに、今後の展望等を示した。本研究では、高速炉炉心材料使用条件下での PNC-FMS の高速中性子照射後の強度特性及び照射中の炉内クリープ強度の評価と中性子照射後の内部微細組織観察から、本鋼のラス組織の回復挙動と析出形成分布を観察評価し、照射後強度特性は主要内部組織であるラス組織の安定性に強く依存することがはじめて明らかにされ、微細組織の系統的観察解析に基づき照射による機械的特性変化が相関的に評価可能であり、PNC-FMS は優れた特性を有していることが実証された。

以上、本論文では、高速炉炉心材料として開発された PNC-FMS について高速炉運転条件を考慮し、照射後強度特性と微細組織解析を実施した。その結果、内部組織は高温高照射量まで安定であり、機械的強度特性も比較的高温まで保持されることを実証した。また、高速炉環境で使用される材料特性は内部組織と密接に関連して相関しており、機械的強度特性は組織解析から半定量的に評価できることを初めて明らかにした。これにより、本研究成果は、今後の実証炉の高速炉炉心材料設計へ適用に有効であることが示された。これらの知見は、原子力材料学ならびに原子力工学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。