

学 位 論 文 題 名

改良型316鋼のスエリング挙動に及ぼす
照射環境の影響に関する研究

学位論文内容の要旨

低環境負荷や省資源の一環として核燃料サイクルの確立は重要であり、このサイクルの中核が高速増殖炉である。この原子炉は軽水炉に比べ炉心が高温であり、かつ増殖比を上げるために高速中性子成分の多いスペクトルとなっている。そのため、一層の安全性を担保する高温強度と耐高速中性子照射性を有する炉心構造材料が求められる。

現在までの研究・開発により、コールドスクリーニング試験と材料の改良の結果、高性能の改良型 316 ステンレス鋼被覆管が開発された。以来、数年にわたりこの被覆管材料の実使用環境での中性子照射が行われ、高温強度と耐スエリング性の適合、また試験環境の効果の結果が注目されているところである。

このような背景のもと、本研究は改良型 316 ステンレス鋼被覆管の、①高速中性子照射下におけるスエリング特性と組織変化挙動を明らかにし、②スエリング挙動に対する照射環境因子の影響を検討し、③それらを踏まえて更なる高性能化の方策を模索することを目的とした。

第 1 章では、近未来のエネルギー事情、核燃料サイクル必要性およびその中核となる高速増殖炉システムに関連する構造材料の課題を概説し、本研究の目的を示した。

第 2 章では、改良型 316 オーステナイト鋼の被覆管のスエリング挙動と微量添加元素の効果を明らかにし、特に、装荷形態の重要性を指摘した。燃料を組み込まない中性子照射実験である材料照射試験では、改良型 316 オーステナイト鋼は基本的に優れた耐スエリング性を有した。さらに、ナトリウム冷却高速炉の設計では最大中性子フラックス位置の温度は約 500℃であり、この温度域でのスエリング特性は P、Ti 複合添加により著しく改善され、これがリン化合物形成によることを明らかにした。しかしながら、燃料を組み込んだ中性子照射実験である燃料集合体照射試験では、500℃付近で明確なスエリングが確認され、材料照射とは対照的な挙動を示した。これにより、スエリング挙動の主要因子として温度、照射量以外に装荷形態による環境効果が重要なことを指摘した。

第 3 章では、改良型 316 オーステナイト鋼のスエリング挙動を材料組織学的（欠陥形態や析出物形成等）に考察した。材料照射試験でスエリングに対する顕著な複合添加効果については、P、Ti、Si の複合添加により 500 から 600℃でリン化合物が安定に形成し、その界面にヘリウムバブルが

形成し、バブルからボイドへの転換が遅れるためと推察した。また、500℃以下の耐スエリング性はTi、Nbの効果であり、 γ' やG相の析出物を抑制するとともにスエリングも抑制する。また冷間加工は組織安定性の向上に非常に効果的である。また、Tiはリン化合物を安定化し、微細なMC相として析出し転位組織の安定性を向上させる。これに対して、燃料集合体照射の場合、照射組織は極めて不安定であり、約500℃の照射では75dpa以上でリン化合物の再固溶、 M_6C 相とG相の析出、さらにボイドの形成が同時に生じる。このスエリング挙動の相違は、被覆管内部組織の点欠陥シンの状態が装荷形態により大きく影響されることを示している。

第4章は、照射試験環境の相違を整理し、各々の環境因子がスエリング挙動等に及ぼす影響について検討するとともに、改良型316 オーステナイト鋼被覆管の改良方策を示した。重要な照射環境因子として、照射中に生じる温度変動、被覆管肉厚方向の温度勾配、局部応力、冷却材である高温液体ナトリウムとの相互作用、核分裂生成ヘリウムが挙げられた。照射後試験の結果から、特定の環境要因のみで材料照射試験と集合体照射試験におけるスエリング挙動の差を説明することはできなかった。そのため、特に集合体照射のスエリングや組織変化は複数の要因の複合作用すると考えた。

各々の環境因子の比較の結果、集合体照射の場合は照射中の温度低下と肉厚方向の温度勾配が大きく、特異的組織変化とスエリング発生のトリガーとなると判断した。また、スエリングの開始直後から温度勾配に起因する二次応力の影響が現われはじめる。その他の一次応力、ナトリウムとの相互作用、核分裂ヘリウムは単独では影響が小さいが、複合化すると燃料被覆管の組織変化を促進する可能性がある。

以上の結果から、改良型316 オーステナイト鋼被覆管の耐スエリング性の改良法として以下の事項を提案した。まず、Ti添加量を増加して転位組織とリン化合物の安定化を図るとともに、Nbを積極的に添加して、より高温の溶体化処理を可能にすることが効果的である。被覆管の微細組織観察から、転位組織の安定性は照射組織発達に最大の影響を持つと推察した。照射下での転位組織の発達は、照射による転位の形成と熱的回復がバランスにより、冷間加工による初期転位は照射中に減少し、新たに照射による転位は増加するが、初期転位はらせん成分の比率が大きく、照射による転位は刃状成分が多いと推定される。ここでらせん転位は刃状転位よりもニュートラルシンクに近いことから、組織安定性を考えると、製造時の冷間加工で導入されるらせん転位を高照射量まで安定化させる改良方策が有効と推定した。また、SiとPは耐スエリング性向上に著しく有効であるが、Siは組織安定性とクリープ強度を低下する恐れがあり、またPは溶接性を低下させるため、どちらも増量することは得策ではない。

以上、本論文では、高速増殖炉炉心材料である改良型316 オーステナイト鋼のスエリング挙動を組織観察と照射環境因子の解析を行い、スエリング挙動に影響する照射環境因子と材料学的要因を明確にした。またこの結果と実使用条件に基づき、更なる改良法を模索し、具体策を提案した。これはオーステナイト鋼の原子力材料としての適用範囲の拡大につながるとともに、今後の高性能材料開発の指針とすることができる。

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 市 野 瀬 英 喜
副 査 教 授 渡 辺 精 一

学 位 論 文 題 名

改良型316鋼のスエリング挙動に及ぼす 照射環境の影響に関する研究

低環境負荷と省資源の一環として燃料サイクルの確立と高速増殖炉の実現が期待されている。この原子炉は軽水炉に比べて高温で、高速中性子の多いスペクトルのため、高温強度と耐照射性の構造材料が要求される。最近の数年にわたる被覆管材料の開発・改良と実使用環境の中性子照射が実施され、その高温強度と耐照射性が検討されてきた。本研究では、改良型316ステンレス鋼被覆管の中性子照射によるスエリング特性と組織変化を検討し、照射環境因子の影響を明確にし、高性能化を模索することを目的としている。その主要な成果は次の点に纏められる。

①改良型316オーステナイト鋼の被覆管のマクロ的スエリング挙動と微量添加元素の効果を明らかにし、特に、装荷形態の重要性を指摘した。材料照射試験では、この材料は基本的に優れた耐スエリング性を示し、さらに、P、Ti複合添加により著しく向上した。これはリン化合物形成が原因する。しかしながら、燃料集合体照射試験では、スエリングが顕著になり、対照的な結果となった。この結果から、著者はスエリング挙動の主要因子として温度と照射量以外に装荷形態による環境効果が重要なことを指摘した。

②スエリング挙動を欠陥形態や析出物形成等のミクロ組織から考察し、材料照射試験での複合添加効果は、P、Ti、Siにより安定なリン化合物が形成し、その界面へのヘリウムバブルの吸着によるボイド転換の遅れが原因と結論した。また、Ti、Nbは γ' やG相の析出物を抑制するとともにスエリングも抑制することを示した。また冷間加工は組織安定性に非常に有効である。これに対して、燃料集合体照射の場合、ミクロ組織は不安定であり、リン化合物の再固溶、 M_6C 相とG相の析出、さらにボイドの形成が同時に生じることを指摘している。また、両者の相違は点欠陥シンクの状態が装荷形態により大きく影響されるとしている。

③重要な環境因子として、照射中の温度変動、被覆管肉厚方向の温度勾配、局部応力、ナトリウム冷却材との相互作用、ヘリウムなどを挙げた。集合体照射の場合は温度低下と肉厚方向の温度

勾配の効果が大きく、特異的組織変化とスエリング発生のトリガーとなると判断した。また、一次応力、ナトリウムとの相互作用、ヘリウムは、複合化した場合に組織変化を促進することを指摘した。

④オーステナイト鋼被覆管の高性能化のために、Ti を増量して転位組織とリン化物の安定化を図るとともに、Nb を積極的に添加して、高温の溶体化処理を可能にすることを提言した。冷間加工による初期転位の減少と照射による転位の増加はバランスするが、ニュートラルシンクに近いらせん転位の減少が問題であることを指摘した。すなわち、組織安定性の観点では冷間加工で導入されるらせん転位を Si と P の添加により安定化することが有効と指摘した。

これを要するに、著者は、高速増殖炉炉心材料である改良型 316 オーステナイト鋼のマクロ的スエリング挙動とマイクロ組織の解析を行い、照射環境因子と材料学的要因を明確にし、本材料の高性能化の方法を提案している。これは原子力材料の安全性の向上とともに、今後の材料開発の指針を与えるものであり、材料工学およびエネルギー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。