

学 位 論 文 題 名

高エネルギー粒子線照射環境下における
フェライト鋼の析出挙動と脆化に関する研究

学位論文内容の要旨

本研究は、高速増殖炉や核融合炉の構造材料として有望なフェライト鋼の照射環境下における炭化物やナノ酸化物の析出挙動とそれに伴う脆化を解明することを目的としている。研究の対象は実用材料として炭化物で強化したフェライト/マルテンサイト鋼、また、先進高温材料としてはナノ酸化物で強化した ODS フェライト鋼を選定した。両材料とも中性子照射による機械的性質の影響に対する微視的な検討が十分ではないことから、特に長時間使用による炭化物析出の変化、ナノ分散酸化物粒子の変化、さらには核変換ヘリウムの効果に着目した。本論文は 7 章で構成され、各章の概要は以下の通りである。

第一章は序論で、核融合炉や原子炉の構成材料に関する研究の背景と、その材料開発の課題などからフェライト系鋼の重要性を述べた。

第二章では現在までの材料照射研究で得られた照射効果の知見をまとめ、本研究の目的を述べた。

第三章は、実用条件に相当する長時間の時効、および中性子照射を行なった場合のフェライト/マルテンサイト鋼の微細組織変化の結果をのべている。数千時間に及ぶ時効と中性子照射の結果、主要な析出物は $M_{23}C_6$ 型炭化物であり、粒界やラス境界に析出することがわかった。時効と中性子照射の結果の比較により、微細組織は変化するが、析出挙動が照射により熱時効と異なることを見出した。また、高温長時間領域での脆化の要因として、Laves 相の析出が現れること、また Laves 相の析出領域が照射により低温側にシフトすること、さらに高温で生じるラス境界回復も照射によって促進されたこと、などを明が明らかとなった。

第四章は、ナノ酸化物強化型フェライト鋼(ODS 鋼)中の酸化物粒子の構造についての詳細な検討結果を述べた。各種 ODS 鋼(オーステナイト系、9Cr フェライト/マルテンサイト系、12Cr フェライト系)の酸化物粒子構造を高分解能観察と EDS 分析から解析した結果、Ti 微量添加すると、ナノ酸化物粒子は粒子界面(殻:shell)と中心部分(核:core)で Ti と Y の比に差があり、殻構造(shell

structure)を持つことがはじめて示された。この穀構造での Ti と Y の比は鋼種によって異なり、これは MA による強制固溶状態とその後の熱処理段階で Ti と Y が別々に析出・成長する際の母相構造の影響を強く受けることが示された。

第五章は、中性子照射環境で照射欠陥に並んで重要な因子とされる核変換ヘリウムの影響を検討するために、サイクロトロン加速器を用いて ODS フェライト鋼にヘリウムを注入し、その脆化挙動を調査した。その結果、フェライト系鋼では DBTT が高温へシフトしたのに対して、ODS フェライト鋼は DBTT のシフトは生じなかったことから、ODS フェライト鋼が良好な耐ヘリウム脆化特性を有することが示された。これはナノ酸化物粒子が転位の上昇運動に対する抵抗として働き、転位を安定化させるだけでなく、酸化物粒子界面がヘリウムのトラップサイトとなり、ヘリウムの粒界への凝集・粗大化を抑制したためと考察した。

第六章は、電子線照射によるその場観察を行ない、ODS フェライト鋼中のナノ酸化物の照射下安定性を検討した。その結果、他の報告にあるような電子線照射によるナノ酸化物粒子径の変化は見られず、この構造が安定であることが示された。高分解能観察によると、酸化物粒子界面で若干の変化がわずかに見られたが、これは照射中の雰囲気によるものと推定した。また、この酸化物粒子の安定性は、Ti 添加により強化されていることが示唆された。

第七章は総括である。炭化物強化型フェライト/マルテンサイト鋼は中性子照射により析出が促進・誘起されることを明らかにし、照射脆化は析出挙動に影響されることを明らかにした。いっぽう、ナノ酸化物型の ODS フェライト鋼については、耐照射性の主要因子である酸化物粒子がヘリウム脆化特性に対しても有効であり、Ti 添加により酸化物粒子の構造が安定化され、中性子照射環境での高温強度特性の維持に寄与するものと結論した。(1675 字)

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 大 貫 惣 明
副 査 教 授 成 田 敏 夫
副 査 教 授 渡 辺 精 一
副 査 助 教 授 柴 山 環 樹

学 位 論 文 題 名

高エネルギー粒子線照射環境下における フェライト鋼の析出挙動と脆化に関する研究

本論文は、高エネルギー粒子線の耐性の高い構造材料であるフェライト鋼の照射環境下での析出挙動とそれに伴う脆化を解明することを目的としている。実用材料としては炭化物強化型フェライト/マルテンサイト鋼、また、先進高温材料としてはナノ酸化物強化 ODS フェライト鋼を研究の対象として、長時間使用による炭化物析出の変化、ナノ分散酸化物粒子の変化、さらには核変換ヘリウムの効果について検討している。その主要な成果は次の点に纏められる。

- ① 実用に相当する熱時効と中性子照射によるフェライト/マルテンサイト鋼の微細組織変化をのべている。数千時間の長時間では、 $M_{23}C_6$ 型炭化物が主要析出物であり、粒界やラス境界に析出することがわかった。熱時効と中性子照射の結果の比較により、析出挙動が両者で異なる場合があることを見出した。例えば、脆化の要因となる Laves 相が高温長時間で現れること、照射によりその析出領域が低温にシフトすること、さらに照射がラス境界の回復を促進することなどを明らかにした。
- ② 各種 ODS 鋼(オーステナイト系、9Cr フェライト/マルテンサイト系、12Cr フェライト系)の酸化物粒子構造を高分解能観察と EDS 分析から検討し、Ti 微量添加によりナノ酸化物粒子は粒子界面と中心部分で Ti と Y の異なるシェル構造を持つことをはじめて示した。このシェル構造は鋼種によって異なり、MA による強制固溶と熱処理時の母相構造に依存することを見出した。
- ③ 中性子照射環境で照射欠陥に並んで重要な因子である核変換ヘリウムの効果を検討するために、サイクロトロン加速器を用いてフェライト鋼と ODS 鋼にヘリウム注入し、その脆化挙動を調査している。その結果、フェライト系鋼では DBTT が高温へシフトしたのに対して、ODS フェライト鋼では DBTT のシフトが生じなかったことから、ODS フェライト鋼の良好な耐ヘリウム脆化特性を実証した。これはナノ酸化物粒子が転位の上昇運動の抵抗として働くのに加え、粒子界面がヘリウムのトラップサ

イトとなり、ヘリウムの粒界への凝集・粗大化を抑制すると結論している。

④ ナノ酸化物の照射下安定性を検討するために電子線照射を行ない、他の報告のような粒子径の変化は見られず、Ti 添加によりナノ酸化物粒子の安定性は増すことを明らかにした。

これを要するに、著者は、フェライト鋼の長時間時効と中性子照射から析出と脆化の関係を明らかにし、さらに、ナノ酸化物粒子はシェル構造で耐照射性の原因であるとともに、ヘリウム脆化防止にも有効なことを明らかにした。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おいて重要な知見であり、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。